



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Instituto de Geociências

TIAGO ANTÔNIO TORRES GOMES

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA JAZIDA  
DE PIROCLORO ASSOCIADA AO COMPLEXO ALCALINO CARBONATÍTICO DO  
BARREIRO, ARAXÁ - MG

CAMPINAS

2017

TIAGO ANTÔNIO TORRES GOMES

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA JAZIDA  
DE PIROCLORO, ASSOCIADA AO COMPLEXO ALCALINO CARBONATÍTICO DO  
BARREIRO, ARAXÁ - MG

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO INSTITUTO DE  
GEOCIÊNCIAS DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE  
CAMPINAS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE  
EM GEOCIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOLOGIA E  
RECURSOS NATURAIS

ORIENTADORA: PROFA. DRA. SUELI YOSHINAGA PEREIRA

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL  
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO TIAGO  
ANTÔNIO TORRES GOMES E ORIENTADA PELA  
PROFA. DRA. SUELI YOSHINAGA PEREIRA

CAMPINAS

2017

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** Não se aplica.

**ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5298-728X>

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Geociências  
Cássia Raquel da Silva - CRB 8/5752

G585c Gomes, Tiago Antônio Torres, 1976-  
Caracterização hidrogeológica e simulação numérica da jazida de  
pirocloro associada ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Araxá -  
MG / Tiago Antônio Torres Gomes. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Sueli Yoshinaga Pereira.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Geociências.

1. Hidrogeologia. 2. Métodos dos elementos finitos. 3. Método de  
simulação. I. Pereira, Sueli Yoshinaga, 1961-. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Hydrogeological characterization and numerical simulation of the  
pyrochlore deposit associated to Barreiro Alkaline Carbontatitic Complex, Araxá - MG

**Palavras-chave em inglês:**

Hydrogeology

Finite elements method

Simulation methods

**Área de concentração:** Geologia e Recursos Naturais

**Titulação:** Mestre em Geociências

**Banca examinadora:**

Sueli Yoshinaga Pereira [Orientador]

Ana Elisa Silva de Abreu

Luis de Almeida Prado Bacellar

Renata Guimarães Neto

**Data de defesa:** 30-03-2017

**Programa de Pós-Graduação:** Geociências



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS NA  
ÁREA DE GEOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

**AUTOR:** Tiago Antônio Torres Gomes

Caracterização Hidrogeológica e Simulação Numérica da Jazida de Pirocloro,  
Associada ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Araxá - MG

**ORIENTADORA:** Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira

Aprovado em: 30 / 03 / 2017

**EXAMINADORES:**

Profa. Dra. Sueli Yoshinaga Pereira - Presidente

Profa. Dra. Ana Elisa Silva de Abreu

Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacelar

***A Ata de Defesa assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no processo de vida acadêmica do aluno.***

Campinas, 30 de março de 2017.



À Catarina, Pedro e Matheus: razões da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos vão de encontro a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Obrigado à Catarina, pelo apoio incondicional, durante toda a minha jornada acadêmica, não me deixando desistir, mesmo nas piores tempestades. Aos meus meninos, Matheus e Pedro, que entenderam as ausências do pai. É por vocês que luto, sempre.

Agradeço imensamente à Professora Sueli, por ter me acolhido e acreditado na concretização deste trabalho. Obrigado pelas orientações sempre objetivas e precisas.

Obrigado à Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração, por ter permitido a realização deste trabalho, especialmente a Marcelo Alves Pereira, que acreditou na minha capacidade de levar este projeto adiante. Agradeço também a Adriano Porfírio Rios e Clóvis Sousa por permitir a realização deste trabalho. Aos amigos do Departamento de Homogeneização, pela amizade: Moacir Resende, José Marques Braga, Leandro Dias, Amanda Oliveira, Flávio Bruno e Daniel Silva. À Kely Sehn, Estevão e Lorena pela ajuda nos trabalhos de campo. Aos amigos do Departamento de Meio Ambiente, Lucas, Lessandro, Paulo, José Geraldo, Vinícius e ao estagiário Thiago, por disponibilizar e ajudar na compilação dos dados de monitoramento. Ao Marcos Botelho pela ajuda na revisão do texto.

Aos grandes amigos da empresa *Schlumberger Water Services*, Danilo Almeida e Rafael Albuquerque pela troca de experiências durante o processo de modelamento e amostragem para isótopos.

Por fim, gostaria de agradecer ao grande geólogo Samuel Carneiro, com quem tive a grata oportunidade de me iniciar nos intrincados caminhos da hidrogeologia.

Espero que este trabalho atenda às expectativas de todos que fizeram parte dele.

## SÚMULA CURRICULAR

### **Tiago Antônio Torres Gomes**

Graduado em Engenharia Geológica pela Universidade Federal de Ouro Preto, em Julho de 2011, trabalhou desde o início do curso nas áreas de hidrogeologia e geotecnia de mina, em empresas de mineração no Quadrilátero Ferrífero.

Desenvolveu atividades relativas ao rebaixamento do nível de água na cava da Mina de Alegria Norte, como monitoramento hidrogeológico de poços tubulares profundos, controle da produção e qualidade da água. Definição, de acordo com o modelo hidrogeológico, de localização para novos poços e piezômetros. Criação e implantação da rotina de avaliações de estabilidade dos taludes operacionais e pilhas de estéril nas minas do Complexo Alegria.

Participou da contratação e acompanhamento de obras civis de contenção e estabilização artificial de taludes.

Desenvolveu aplicativos (bancos de dados em Access) para os dados de geotecnia de mina (SlopeSAM) e hidrogeologia (HydroSAM).

Em 2012 assumiu o *Start-up* das áreas de Hidrogeologia e Geotecnia de Mina de nióbio da CBMM, na cidade de Araxá. Desde então, vem desenvolvendo atividades para a caracterização do aquífero associada à mineralização de nióbio, com vistas a proposição de um sistema de rebaixamento do nível de água para garantir a continuidade das atividades mineiras.

*“O mundo das forças não é passível de nenhuma diminuição: pois senão, no tempo infinito se teria tornado fraco e sucumbido. O mundo das forças não é passível de nenhuma cessação: pois senão, esta teria sido alcançada e o relógio da existência pararia. O mundo das forças, portanto, nunca chega a um equilíbrio, nunca tem um instante de repouso. Sua força e seu movimento são de igual grandeza para cada tempo. Seja qual for o estado que este mundo possa alcançar, ele tem de tê-lo alcançado, e não uma vez, mas inúmeras vezes”.*

Friedrich Nietzsche

## RESUMO

As interferências na disponibilidade e qualidade da água de um sistema hídrico, provocadas pela atividade de mineração, devem ser avaliadas pelas empresas, de forma a atuarem visando a continuidade dos seus projetos em longo prazo. A intercessão da lavra de minérios como o nível de água subterrânea, quase sempre, torna-se um problema para as operações, por conta da elevada umidade dos minérios, que pode impactar inclusive no beneficiamento do bem mineral em questão. A jazida de pirocloro, que é o objeto deste estudo, é operada pela Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) desde a década de 1970. Nos últimos cinco anos, com o aprofundamento da cava, viu-se a necessidade de caracterizar a jazida do ponto de vista hidrogeológico, uma vez que, as superfícies de lavra planejadas para o longo prazo mostraram interferência com o nível de água subterrânea, o que inviabiliza fortemente o projeto. O objetivo desta pesquisa é realizar um estudo de caracterização hidrogeológica do aquífero associado à mineração de nióbio, com vistas a gerar dados para o modelamento conceitual e a simulação numérica do fluxo da água subterrânea. A análise dos dados de hidroquímica, hidrodinâmica e isótopos, mostra que o principal aquífero da área de estudo está relacionado ao manto de intemperismo da rocha carbonatítica. Estes alteritos, como foram denominados, apresentam condutividades hidráulicas que variam entre  $10^{-6}$  m/s a  $10^{-5}$  m/s, sendo capeados por solos argilosos menos permeáveis ( $8,7 \times 10^{-7}$  m/s), que funcionam como aquitardos, tornando os aquíferos semi-confinados, localmente. Na porção sudeste da área de estudo há o principal divisor de fluxo subterrâneo e a direção de fluxo observada é de SE para NW, com descarga nas imediações do Barreiro. A calibração da simulação de fluxo apresentou bons níveis de acurácia e representou, de maneira satisfatória, as interpretações realizadas no modelo conceitual. Esta simulação servirá de base para estudos diversos, no que concerne às atividades de gestão das águas subterrâneas no âmbito da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração.

**Palavras Chave:** Modelagem hidrogeológica, Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, Elementos finitos, *Visual ModFlow*.

## ABSTRACT

The interferences in availability and water quality of a hydraulic system, caused by mining activities, must be analyzed by mining companies, in order to continue the long-term projects. The intersection between ore exploitation and groundwater level, often becomes a problem to mining operations, due to the high ore humidity, which can even influence the mineral processing. The pyrochlore deposit, which is the subject of this study, has been operated by the Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) since the 1970s. In the last five years, due to the pit depth, it was necessary to characterize the deposit from hydrogeological point of view. Since the planned pit surfaces for long-term presented interferences with the groundwater level, which strongly makes the project unfeasible, the aim of this research is to perform a hydrogeological characterization study of the aquifer associated with the niobium mining, planning to generate data for numerical modeling of groundwater flow. The analysis of hydrochemical, hydrodynamic and isotope data shows that the main aquifer of the study area is related to the weathering cover of the carbonatite rock. The aquifer has hydraulic conductivities ranging from  $10^{-6}$  m / s to  $10^{-5}$  m / s, being capped by less permeable soils ( $8.7 \times 10^{-7}$  m / s), which work as aquitards, making the aquifers locally semi-confined. In the southeast portion of the study area there is an important underground flow divider and the main flow direction observed is from southeast to northwest, with discharge in the vicinities of Barreiro. The numerical modeling calibration had good levels of accuracy and satisfactory approximation with the conceptual model. The numerical model, calibrated on steady-state will be used for many simulations in groundwater management activities.

**Keywords:** Hydrogeological modelling, Barreiro Alkaline Carbonatitic Complex, Finite Elements, Visual ModFlow.

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

**APHA** – American Public Health Association

**CACB** – Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro

**CBMM** – Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração

**CODEMIG** – Companhia de Desenvolvimento do Estado de Minas Gerais

**COMIPA** – Companhia Mineradora do Pirocloro de Araxá

**CPRM** – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

**DEBA** – Departamento de Barragens

**DEHO** – Departamento de Homogeneização

**DIC** – Dissolved Inorganic Carbon

**IAEA** – International Atomic Energy Agency

**INA** – Indicador de Nível de Água

**INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia

**LSC** – Liquid Scintillation Count

**NRMS** – Normalized Root Mean Square

**SMWW** – Standard Methods for examination of Water and Wastewater

**TU** – Tritium Unit

**UTM** – Universal Transversa de Mercator

**VSLAP** – Viena Standard Light Antarctic Precipitation

**VSMOW** – Viena Standard Mean Ocean Water

**ZB** – Zone Budget

## LISTA DE SÍMBOLOS

%: por cento

$\nabla$  : nabla – indicador de divergente

$\delta$ : desvio em relação à amostra padrão

$\mu\text{S}$ : microsiemens

‰: por mil

$^{14}\text{C}$ : isótopo Carbono 14

$^{13}\text{C}$ : isótopo Carbono 14

$^{16}\text{O}$ : isótopo oxigênio 16

$^{18}\text{O}$ : isótopo oxigênio 18

h: altura, carga hidráulica, hora

$h_0$ : Altura inicial

$K_{fs}$ : condutividade hidráulica saturada de campo

$K_{x,y,z}$ : Condutividade hidráulica nos eixos x, y e z

L: litro

$L_e$ : comprimento do filtro

m: metros

mEq: miliequivalente

mm: milímetros

nL: nano

$^{\circ}\text{C}$ : graus centígrados

R: raio do poço

r: raio do revestimento

R: Recarga

$R_v$ : termo de fonte

Ss: coeficiente de armazenamento específico

Sy: coeficiente de rendimento específico

t: tempo



## SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO .....	15
2 –SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA– ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS E LOCAIS .....	17
2.1 - Fundamentação teórica .....	17
2.2 - Geologia Regional .....	17
2.3 - Geologia Local.....	20
2.4 – Estudos da Hidrogeologia local.....	21
2.5 – Aspectos Fisiográficos .....	22
2.5.1 – <i>Relevo</i> .....	22
2.5.2 – <i>Hidrografia</i> .....	23
2.5.3 – <i>Clima</i> .....	24
3 – OBJETIVOS .....	27
4 – MATERIAIS E MÉTODOS .....	28
4.1 - Primeira etapa – Compilação inicial de dados e análises preliminares.....	28
4.2 – Segunda Etapa – Avaliação da rede de monitoramento existente.....	28
4.3 – Terceira Etapa – Caracterização hidrogeológica local .....	31
4.3.1 – <i>Sondagem e Modelamento geológico</i> .....	31
4.3.2 – <i>Inventário de nascentes</i> .....	32
4.3.3– <i>Ensaio para determinação da condutividade hidráulica</i> .....	32
4.3.4 – <i>Amostragem e análises hidroquímicas</i> .....	38
4.3.5 – <i>Balço iônico</i> .....	40
4.3.6 – <i>Amostragem e análises de Isótopos</i> .....	41
4.4 – Quarta Etapa – Desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual preliminar .....	43
4.5 – Quinta Etapa – Modelo hidrogeológico Numérico computacional .....	43
4.5.1 – <i>Seleção dos códigos numéricos</i> .....	43
4.5.2 – <i>Definição do domínio do modelo e sua discretização</i> .....	44
4.5.3 – <i>Reprodução da geologia no Visual ModFlow</i> .....	44
4.5.4 – <i>Condições de contorno</i> .....	45
4.5.5 – <i>Zone Budgets</i> .....	46
4.5.6 – <i>Calibração do modelo</i> .....	47

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	48
5.1 – Modelamento geológico .....	48
5.2 - Determinação da Condutividade Hidráulica .....	52
5.2.1 – <i>Slug Tests</i> .....	52
5.2.2 – <i>Permeâmetro de Guelph</i> .....	55
5.2.3 – <i>Testes hidráulicos em perfuração</i> .....	60
5.3 – Inventário de nascentes .....	61
5.4 – Hidroquímica.....	62
5.4.1 – <i>Classificação química das águas</i> .....	68
5.4.2 – <i>Índices de saturação</i> .....	69
5.5 – Amostragem e análise de Isótopos .....	72
5.5.1 – <i>Oxigênio-18 e Deutério</i> .....	74
5.5.2 – <i>Trítio</i> .....	76
5.5.3 – <i>Carbono-13</i> .....	80
5.5.4 – <i>Carbono -14</i> .....	81
5.5.5 – <i>Resumo dos dados de datação da água</i> .....	83
6. MODELO HDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.....	84
7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM REGIME PERMANENTE.....	89
7.1 – Domínio do modelo.....	89
7.2 – Reprodução da Geologia e atribuição de parâmetros hidrodinâmicos .....	89
7.3 – Condições de contorno .....	91
7.3.1 – <i>Zero Flow (Fluxo nulo)</i> .....	91
7.3.2 – <i>Recharge (Recarga)</i> .....	92
7.3.3 – <i>Módulo Rivers e Constant Heads (Rios e carga constante)</i> .....	93
7.3.4 – <i>Módulo Drains (Drenos)</i> .....	94
7.4 – Zone Budgets (Zonas de balanço hídrico).....	95
7.5 – Calibração do modelo matemático .....	96
7.5.1 – <i>Carga Hidráulica</i> .....	96
7.5.2 – <i>Descarga de água subterrânea nos cursos de água</i> .....	101
7.5.3 – <i>Balanço de Massa</i> .....	103
7.6 – Fluxo de água subterrânea.....	103
8 – CONCLUSÕES.....	106
9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	109

## 1 - INTRODUÇÃO

---

Esta pesquisa insere-se no campo dos estudos da hidrogeologia e parte do pressuposto de que entender a dinâmica dos sistemas hídricos subterrâneos é fundamental para a prevenção de eventuais impactos à disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos locais, podendo influenciar na eficiência econômica e na viabilidade da operação mineira (ARDEJANI *et al.*, 2003a).

O campo empírico da pesquisa é a Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM), que opera uma mina de pirocloro e uma usina de concentração de nióbio, localizada no município de Araxá, no estado de Minas Gerais. O empreendimento encontra-se inserido no Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro (CACB), na região do Alto Paranaíba. A reserva de nióbio foi cubada inicialmente em 185,73 milhões de toneladas de minério com aproximadamente 2.5% de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (GUIMARÃES, 1957). As atividades minerárias se iniciaram no final da década de 1970 e atualmente são lavrados minérios de nióbio e fosfato em cavas a céu aberto. A mina da CBMM é geograficamente muito próxima da Estância Hidromineral do Barreiro, conhecida mundialmente pela sua variedade composicional e complexidade hídrica. Além disso, a leste e a oeste da mina de nióbio existem duas cavas da companhia Vale Fertilizantes onde se tem realizado o rebaixamento do nível de água já há alguns anos (APÊNDICE A).

As operações de lavra do minério de nióbio são realizadas de acordo com o sequenciamento dos trabalhos, desde a escala de curto prazo (planejamento de lavra diária) até o longo prazo (próximos vinte anos). Nos últimos cinco anos, a escavação na mina da CBMM se aproximou consideravelmente do nível de água subterrânea local. Dessa forma, a continuidade da lavra se torna impraticável abaixo deste plano, caso nenhuma ação seja tomada, uma vez que, o teor de umidade do minério inviabiliza as operações de escavação, bem como o seu tratamento posterior.

Para Hanna *et al.* (1994), o fluxo de água subterrânea em larga escala em uma mina pode reduzir a produção, atrasar a execução da lavra e piorar os fatores de segurança no que concerne à estabilidade dos seus taludes.

Diante disso, é indispensável que o entendimento da hidrogeologia seja aprofundado, para que as atividades de lavra possam ser planejadas adequadamente, evitando impactos relevantes no sistema hídrico, tendo em vista a continuidade da extração do minério.

Neste contexto, o encadeamento de ações mitigadoras das interferências, ante a atuação antrópica no sistema hídrico, segue um protocolo mínimo de trabalhos, discutido a partir deste ponto.

Anderson & Woessner (1992) sugerem que, primeiramente, seja feita uma simplificação do problema, obtendo-se uma ideia geral de como a água subterrânea se comporta no meio poroso ou fraturado. Esta primeira aproximação é denominada modelagem conceitual e figura como uma poderosa ferramenta para a definição dos trabalhos subsequentes, como por exemplo, a caracterização dos principais litotipos e a definição de parâmetros hidrodinâmicos e hidroquímicos do meio estudado.

Para Morton & Merek (1993) os estudos de caracterização hidrogeológica em uma mina são divididos em três fases: a primeira tem o objetivo de determinar os níveis de água locais, o que pode ser realizado pelo estudo de furos de sonda utilizados na pesquisa geológica. O objetivo da segunda fase é indicar um nível de confiança para os possíveis impactos da lavra na água subterrânea e vice-versa. Este nível de confiança é determinado pela qualidade das informações obtidas na primeira fase. Na fase três, o objetivo é planejar como reduzir ou remover os impactos avaliados na fase dois. Isto é feito normalmente por tentativas, modelamento computadorizado ou pela aplicação da experiência prática. O nível de sofisticação da fase três é, obviamente, determinado pelos custos e riscos envolvidos.

Portanto, a caracterização hidrogeológica deste trabalho de pesquisa contemplou a identificação dos principais litotipos da região, um estudo hidroquímico e isotópico, tanto das águas subterrâneas, quanto as águas de nascentes e a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero em questão.

De posse de todas as informações e, após a elaboração do modelo conceitual, foi possível criar o modelo hidrogeológico numérico, que é um instrumento importante para fornecer informações a respeito da resposta do sistema em função de diversos cenários possíveis (BEAR *et al.*, 1992).

## 2 –SÍNTESE BIBLIOGRÁFICA– ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS E LOCAIS

---

### 2.1 - Fundamentação teórica

Os primeiros trabalhos realizados na região do CACB são de Andrade Jr. (1925) e Guimarães (1925). São trabalhos de reconhecimento geológico, com o objetivo de descobrir minerais radioativos, uma vez que, já existiam estudos sobre a anomalia radioativa associada à Fonte Dona Beja (CAMINHOÁ, 1890).

Diversos trabalhos foram realizados, posteriormente, no sentido de entender o manto de intemperismo que se instalou neste local e também com foco nos aspectos geotectônicos e estruturais da Faixa de Dobramentos Brasília (ALMEIDA, 1967). Dentre eles podemos destacar: Barbosa (1937), Hassui & Cordani (1968), Hassui *et al.* (1975), Sad & Torres (1976), Almeida (1983), Issa Filho *et al.* (1984), Torres & Gaspar (1995), Seer (1999), Moraes *et al.* (2008) e Seer *et al.* (2014).

### 2.2 - Geologia Regional

A região em que se encontra a mina de nióbio faz parte do setor meridional da Faixa de Dobramentos Brasília, edificada no bordo oeste do Cráton do São Francisco e que se estende por mais de 1.000 km na direção norte/sul, pelos estados de Minas Gerais, Goiás, Distrito Federal e Tocantins (ALMEIDA, 1967). A porção interna desta faixa está, em sua grande parte, ocupada por rochas dos Grupos Araxá e Serra da Mesa, com características de cinturões interiores neoproterozóicos (BARBOSA, 1955).

Sob o ponto de vista tectônico, a região de Araxá está estruturada em uma dobra sinformal regional, denominada Sinforma de Araxá (Figura 2.1). Esta estrutura regional tem seus flancos principais nos setores nordeste e sudoeste e sua linha de charneira apresenta direção aproximada N70W, com caimento suave para NW. Em seu flanco sul, está localizada a Zona de Cisalhamento da Bocaina que consiste em um sistema de falhas transcorrentes sinistrais (SEER, 1999).

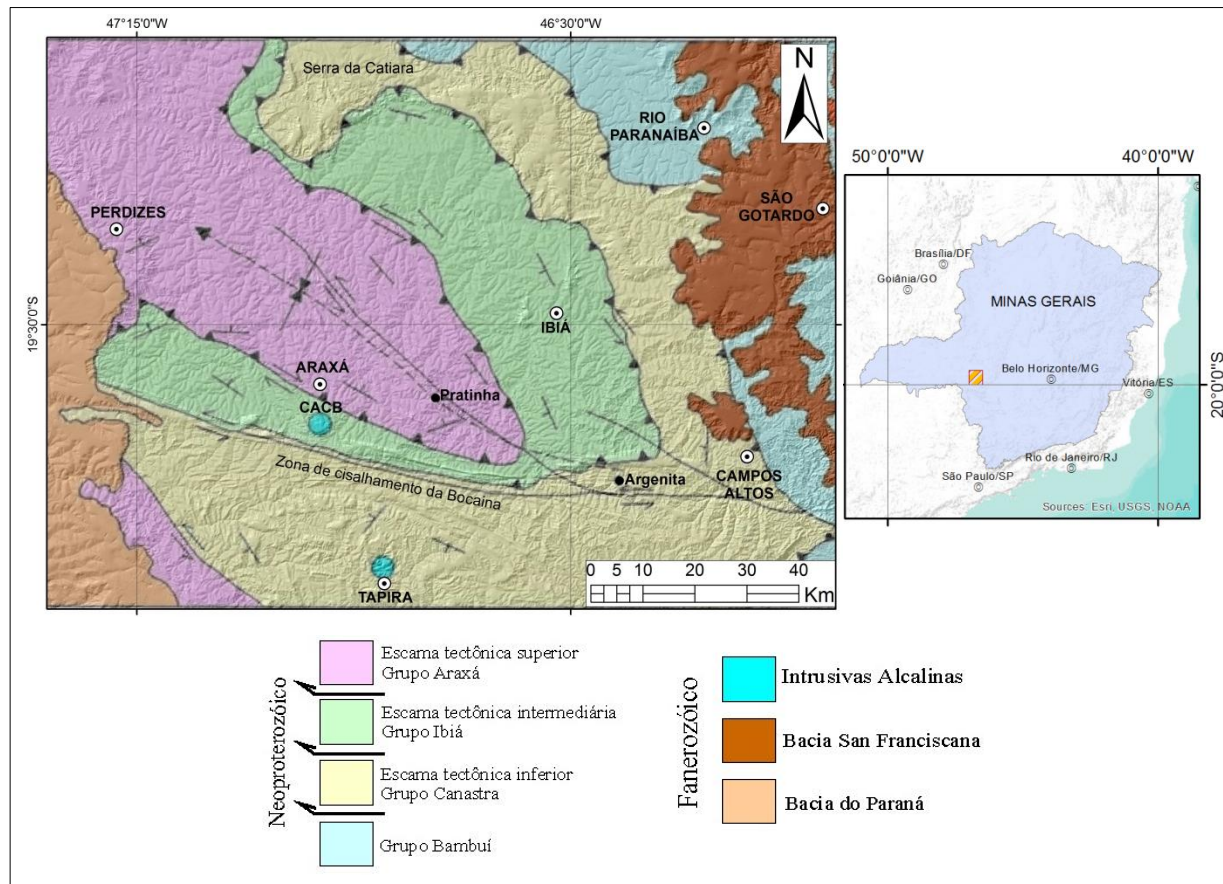


Figura 2.1 - Mapa geológico da Sinforma de Araxá. Modificado de Seer (1999).

A tectonoestratigrafia da região compreende três escamas tectônicas alóctones, separadas por zonas de cisalhamento que configuram falhas de empurrão. Na escama inferior, ocorrem as litologias do Grupo Canastra que, por sua vez, cavalga o Grupo Bambuí, que caracteriza uma cobertura cratônica autóctone situada a leste da área estudada. A escama tectônica intermediária reúne as litologias do Grupo Ibiá. Empurrada sobre esta ocorre a escama tectônica superior que é constituída pelas rochas do Grupo Araxá (Figura 2.2).

O Grupo Canastra é constituído por um conjunto de rochas metassedimentares, em grande parte carbonosas e com fácies carbonatadas; seus contatos com as demais unidades geológicas da região são tectônicos, através de zonas de cisalhamento. Este conjunto de rochas é constituído por ortoquartzitos, quartzitos micáceos, filitos sericíticos, filitos carbonosos, grafita xistos, cloritóide-grafita xistos, granada-grafita xistos e subordinadamente, por metamargas e cloritaxistos com foliação bem desenvolvida (SILVA, 2003); (SILVA *et al.*, 2004); (SILVA *et al.* 2006) e (SILVA *et al.*, 2012).

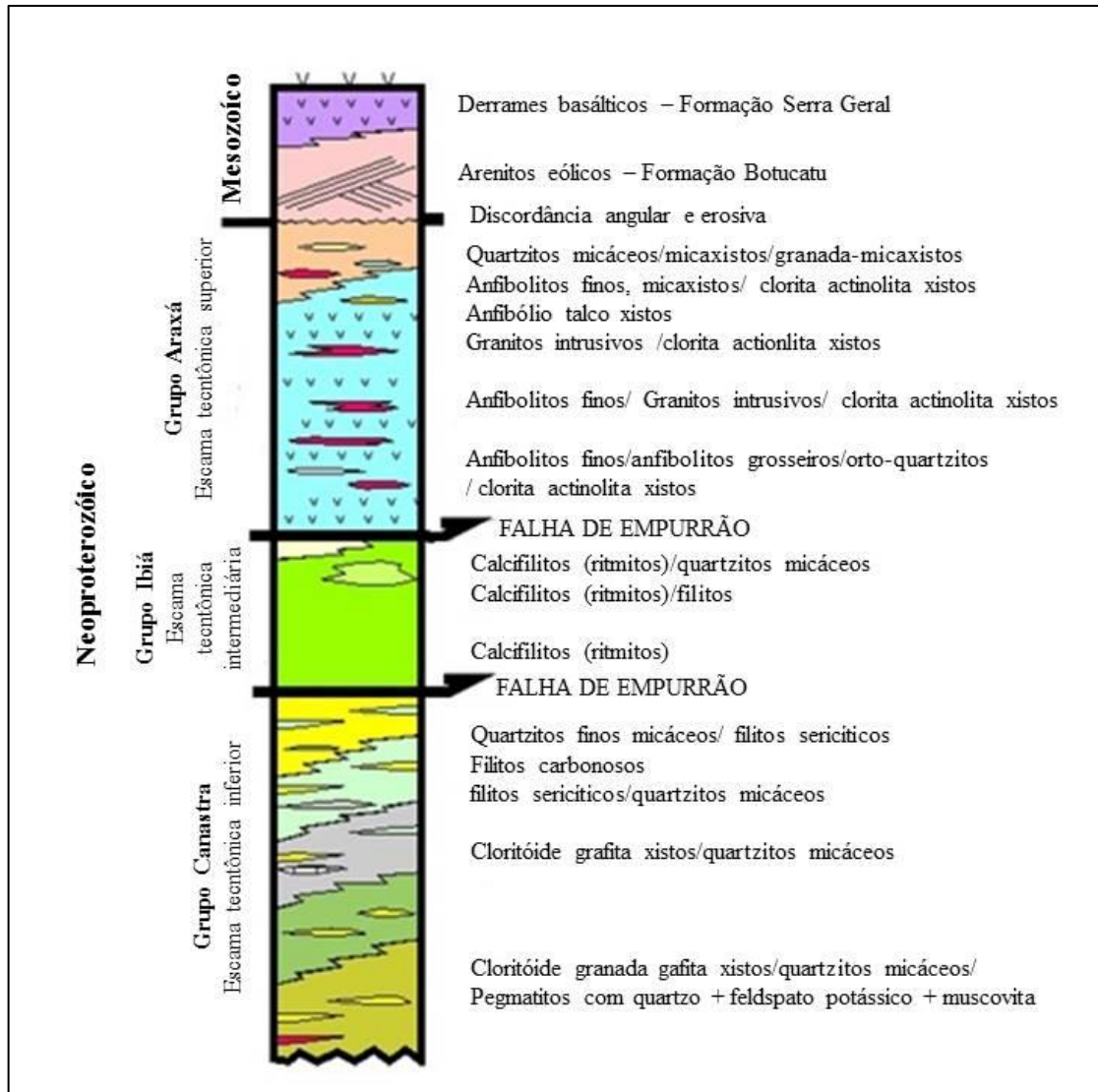


Figura 2.2 - Tectonoestratigrafia da Sinforma de Araxá. (SEER, 1999).

O Grupo Ibiá compreende um conjunto de rochas metassedimentares que se distribuem a sudoeste, sul, sudeste, leste, nordeste e norte da cidade de Araxá. Seus contatos, tanto com o Grupo Canastra quanto com o Grupo Araxá, são tectônicos, através de zonas de cisalhamento. Seus litotipos principais são calcifilitos, quartzo-filitos, filitos e quartzitos micáceos com foliação bem desenvolvida, sendo comum a presença de veios de quartzo e carbonato paralelizados à foliação principal (SEER, 1999).

O Grupo Araxá está inserido na zona mais interna da Sinforma de Araxá e ao longo do Rio Araguari. Seus contatos, assim como os demais grupos, são tectônicos, através de zonas de cisalhamento. Esta unidade está representada por um conjunto metaíneo máfico/ultramáfico – metassedimentar, intrudido por corpos de granitóides ricos em pegmatitos (BARBOSA, 1955).

### 2.3 - Geologia Local

A reserva mineral de nióbio está localizada no Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro que, junto com os complexos de Tapira, Salitre e Serra Negra, integrando um conjunto de complexos carbonatíticos e kimberlíticos (GIBSON *et al.*, 1995b). O complexo possui forma circular, com cerca de 5 km de diâmetro e está encaixado por quartzitos e xistos proterozóicos do Grupo Ibiá (SEER, 1999) (Figura 2.3).

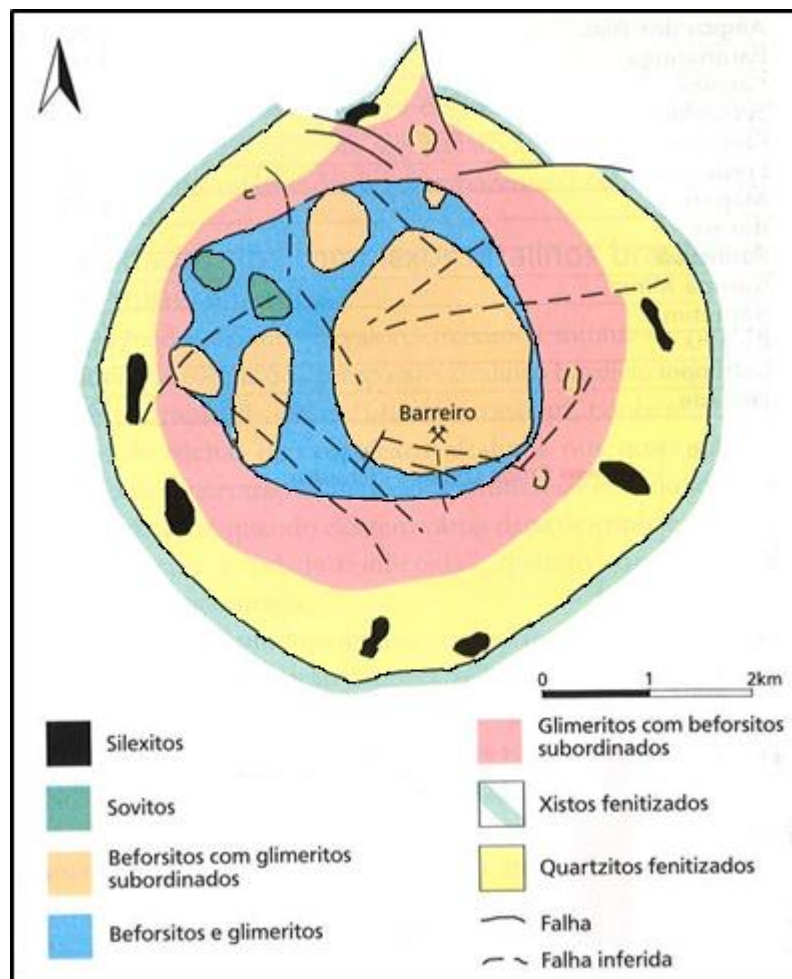


Figura 2.3 - Mapa Geológico do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro. Silva (1986)

Na porção central do complexo afloram beforitos e glimeritos, com sovitos subordinados. Este núcleo carbonatítico é envolvido por glimeritos, com beforitos subordinados, que fazem o anel mais externo de rochas carbonatíticas. As rochas alcalinas são totalmente envolvidas por um largo anel de quartzitos e micaxistos fenitizados.

Segundo Issa Filho *et al.* (1984), a estrutura de Araxá é típica de um complexo erodido composto pelas seguintes fases (Figura 2.4): (a) intrusão de rochas ultrabásicas duníticas e



peridotíticas em meio às supracrustais do Grupo Ibiá ; (b) intrusão do magma carbonatítico e início do metassomatismo das rochas ultrabásicas, gerando glimeritos e fenitizando as rochas encaixantes; (c) glimeritização completa das rochas ultrabásicas e a fenitização das encaixantes, gerando núcleos de silexitos em meio aos quartzitos fenitizados; (d) erosão e intemperismo das rochas alcalinas gerando um manto de intemperismo no qual ocorreu o enriquecimento residual de minerais resistentes.

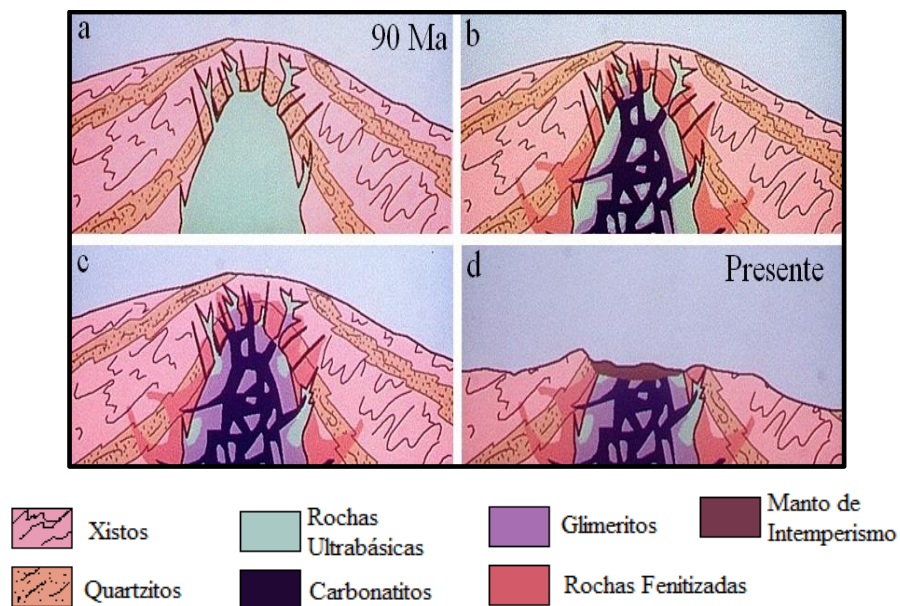


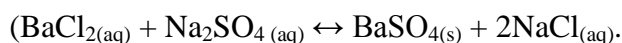
Figura 2.4 - Gênese do CACB. Issa Filho *et al.* (1984)

Os minérios supergênicos e residuais totalizam 414 milhões de toneladas de minério com 3,3% de  $P_2O_5$  e 438 milhões de toneladas de minério com 2,5% de  $Nb_2O_5$ . Atualmente, o minério lavrado na mina é essencialmente laterítico. Superficialmente, segundo Biondi (2015), tem-se uma crosta laterítica ferruginosa, com presença de limonita/goethita e magnetita, que concentra pirocloro e apatita. Abaixo desta crosta, ocorre o principal corpo mineralizado, ou seja, um regolito, formado pela alteração e lixiviação do carbonatito e que concentra bário-pirocloro (pandaita), apatita e monazita (ISSA FILHO *et al.*, 2001).

## 2.4 – Estudos da Hidrogeologia local

Os trabalhos de cunho hidrogeológico são bastante escassos na região: Viana *et al.* (1998), realizaram um importante inventário sobre poços de monitoramento e poços tubulares, além de estudos hidroquímicos em águas de nascentes e subterrâneas. Entretanto, estes trabalhos foram concentrados apenas na região da estância hidromineral do Barreiro. Além

disso, descreveram e caracterizaram o aquífero em dois tipos: granular e fraturado. Neste trabalho são citados alguns valores de condutividade hidráulica e vazões específicas de alguns poços, servindo, de acordo como o próprio autor, apenas como uma primeira aproximação. Este estudo, denominado Estudo Geoambiental do Barreiro foi encomendado à CPRM pela extinta COMIG, hoje CODEMIG (Companhia de Desenvolvimento de Estado de Minas Gerais). Beato *et al.* (2000), fazem uma avaliação hidrogeológica da região do Barreiro, abordando a contaminação das águas subterrâneas por bário. Segundo estes autores, a contaminação começou a ser detectada em 1982, após análises de água do lago da Barragem B4. A utilização do cloreto de cálcio para a concentração do minério de nióbio gerava o cloreto de bário, ou seja, um sal de elevada solubilidade, que era descartado na Barragem B4. Ainda segundo Beato *et al.* (2000) a solução adotada à época, e que até os dias de hoje é aplicada, foi a utilização de poços infiltradores para adicionar sulfato de sódio aos corpos hídricos, promovendo a neutralização da pluma. O sulfato de sódio, em contato com o cloreto de bário, forma a barita, que é um mineral pouco solúvel e abundante na área de estudo:



Atualmente, os trabalhos de neutralização e bombeamento por poços de sangria, executados na área da B4 e ao longo do córrego da Mata, apresentam efeitos positivos e mantêm a extensão da pluma próxima à Área Industrial I. Em poços localizados fora da área da pluma os teores de bário são relativamente mais baixos, originários da dissolução do carbonato de bário, existente nas rochas do CACB, ou seja, apresentando valores naturais.

A dissertação de Mestrado de Raposo (2011) faz uma caracterização mais abrangente, propondo um modelo conceitual do aquífero associado ao CACB, realizando também um estudo hidroquímico e isotópico das águas e separando-as em três populações distintas (Águas do interior do CACB, Águas associadas aos quartzitos fenitizados e Águas Mesotermiais).

Alguns trabalhos de cunho isotópico foram realizados na região de Araxá por Mancini (2002), Mancini & Bonotto (2012) e Bonotto (2014), com vistas a estudar a migração de radionuclídeos nas águas de superfície e subterrâneas.

## **2.5 – Aspectos Fisiográficos**

### **2.5.1 – Relevô**

A jazida de minério de nióbio está posicionada ao sul da cidade de Araxá, na parte central do Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro (CACB) que apresenta cotas, de acordo com o mapa hipsométrico da figura 2.5, variando entre 935 e 1225m (ROCHA & SEER, 2008).

Os padrões de unidades morfológicas na região do CACB são constituídos por relevos de denudação de topo convexo (FERREIRA, 2005).

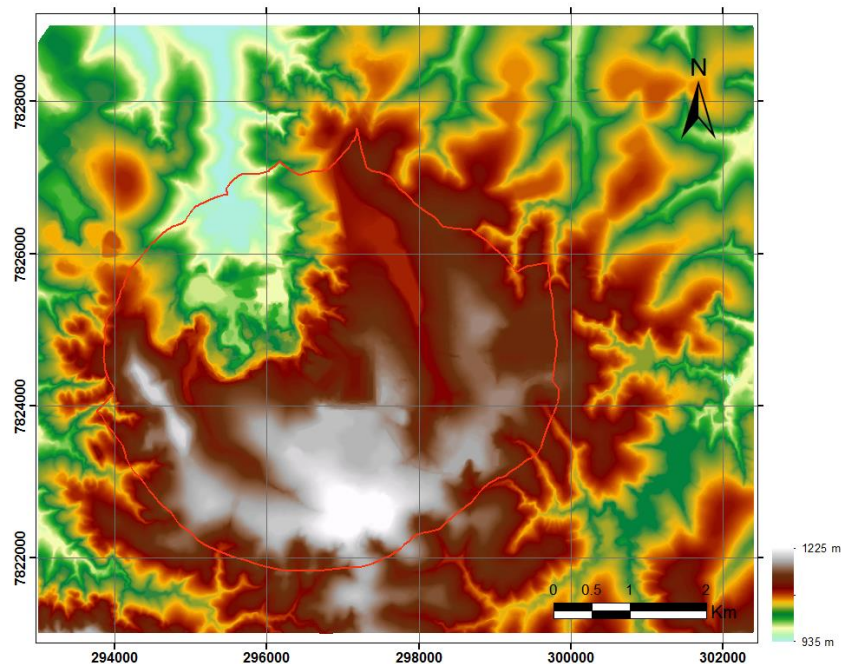


Figura 2.5 – Mapa hipsométrico da área de estudo. Limites do CACB em vermelho.

### 2.5.2 – Hidrografia

A rede hidrográfica é composta por vários córregos, que tem suas nascentes posicionadas na parte interna e também nas bordas do domo formado pela intrusão.

A bacia de drenagem interna ao anel de quartzitos fenitizados é formada pelos córregos dos Borges, Baritina, da Mata, da Cascatinha, Triffon (estes dois últimos já bastante antropizados), todos afluentes do córrego do Sal, que segue seu curso pela porção norte do domo e atravessa a Estância Hidromineral do Barreiro. A rede externa se configura como um conjunto de drenagens radiais centrífugas, que têm sua origem no domínio do anel de quartzitos fenitizados, formando os seguintes córregos: Capivarinha, da Cava, da Bocaina, Feio, Santa Rita, Mourão Rachado, Santa Luzia e Pirapetinga (Figura 2.6 A).

Todos esses córregos seguem pela rocha encaixante, sofrem uma inflexão para norte-noroeste e junto com o córrego do Sal são afluentes do Rio Quebra Anzol, que por sua vez é afluente da margem direita do Rio Araguari. Todo esse sistema faz parte da Bacia hidrográfica do Alto Paranaíba (Figura 2.6 B).

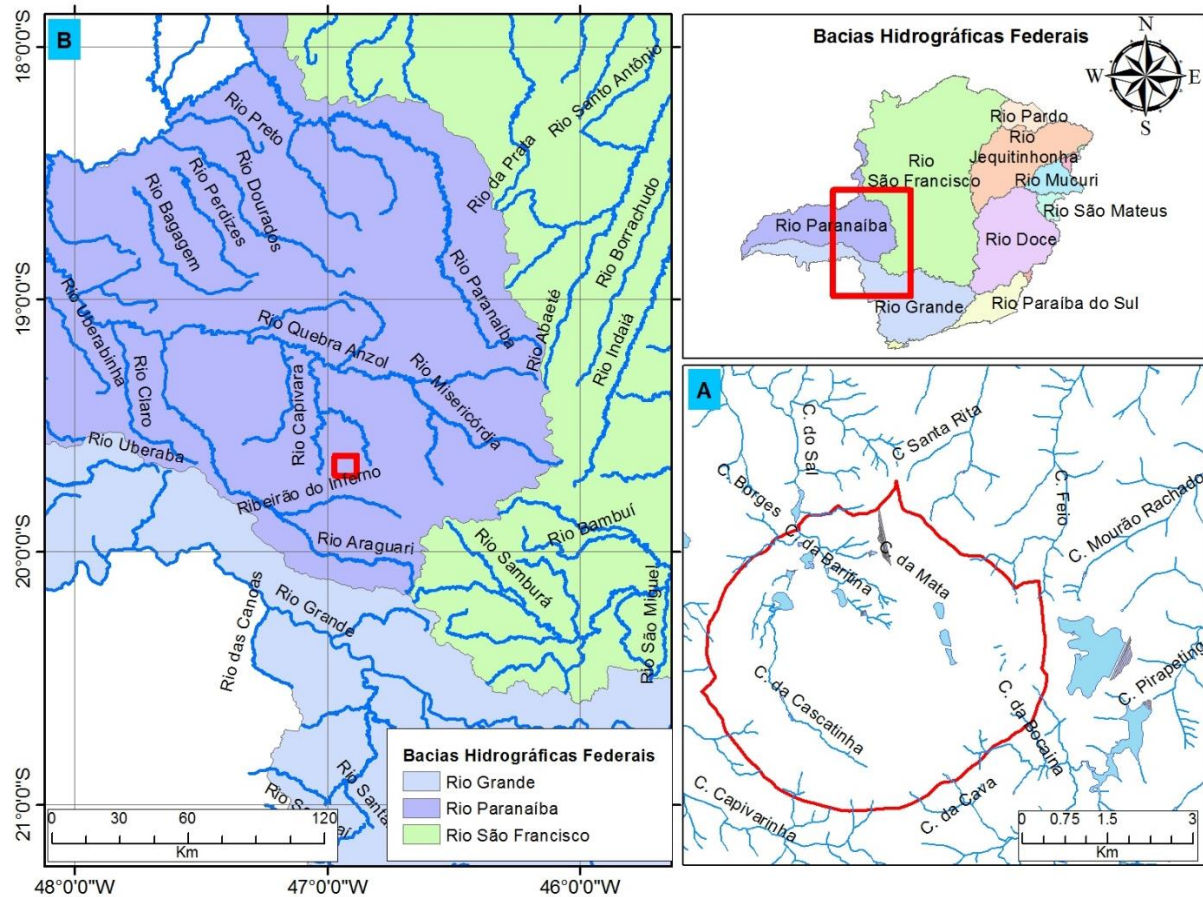


Figura 2.6 – Rede de drenagem associada ao CACB. (A) Hidrografia local; (B) Hidrografia regional

### 2.5.3 – *Clima*

A área de estudo localiza-se em uma zona de clima tropical ameno, que se caracteriza por ser quente durante grande parte do ano, com 5 meses secos (maio, junho, julho, agosto e setembro) e por uma estação chuvosa que se inicia em outubro/novembro e termina em fevereiro/março do ano subsequente.

Os dados de pluviometria utilizados neste trabalho foram obtidos na estação meteorológica mais próxima da área de estudo (Tabela 1.1), localizada no município de Araxá e mantida pelo INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (Lat: 19,57 S / Long: 46,93 W / Altitude: 1004 m).

Tabela 1.1 – Resumo dos dados Meteorológicos Estação Araxá INMET (Val. Médios – 1971 a 2014)

<b>Mês</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>
Janeiro	21,7	296
Fevereiro	22,2	187
Março	22,0	169
Abril	20,7	99
Maio	19,2	44
Junho	17,9	17
Julho	17,5	20
Agosto	19,4	20
Setembro	20,5	67
Outubro	21,4	154
Novembro	21,3	208
Dezembro	21,1	293
<b>TOTAL (mm)</b>		<b>1574</b>

Fonte: INMET

Com base nos dados climáticos obtidos nesta estação foi possível realizar um balanço hídrico climatológico, para estimar o excedente hídrico disponível na área de interesse. Para o cálculo das parcelas do ciclo hidrológico, foram usados os dados obtidos junto ao INMET. A análise foi feita utilizando o método proposto por Thornthwaite & Mather (1955) (Tabela 1.2).

Tabela 1.2 – Balanço hídrico climatológico

<b>Mês</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Precipitação (mm)</b>	<b>ETP (mm)</b>	<b>ETR (mm)</b>	<b>DEF (mm)</b>	<b>EXC (mm)</b>
Janeiro	21,7	296	96	96	0	200
Fevereiro	22,2	187	92	92	0	95
Março	22,0	169	96	96	0	73
Abril	20,7	99	77	77	0	22
Maio	19,2	44	65	63	2	0
Junho	17,9	17	52	41	11	0
Julho	17,5	20	50	35	15	0
Agosto	19,4	20	65	35	30	0
Setembro	20,5	67	74	69	5	0
Outubro	21,4	154	89	89	0	0
Novembro	21,3	208	89	89	0	110
Dezembro	21,1	293	92	92	0	201
<b>TOTAL (mm)</b>		<b>1574</b>	<b>937</b>	<b>874</b>	<b>63</b>	<b>701</b>

Fonte: INMET

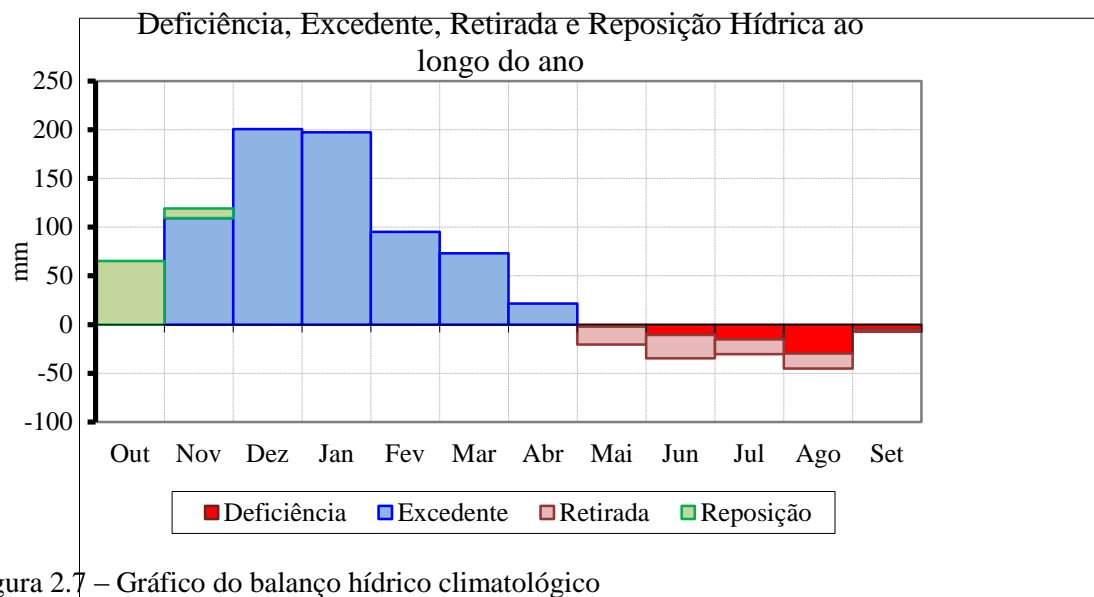


Figura 2.7 – Gráfico do balanço hídrico climatológico

Os dados históricos indicam que a região de estudo é caracterizada por um período de excedente hídrico entre os meses novembro e abril, com a reposição ocorrendo entre outubro e novembro. No período seco, que vai de maio a setembro, há o uso da reserva hídrica, com o maior déficit em agosto. O excedente médio anual é calculado em 701 mm/ano, que equivale a aproximadamente 44% da precipitação anual (Figura 2.7). Este valor pode ser entendido como a recarga máxima que pode abastecer os aquíferos da região.

### 3 – OBJETIVOS

---

O principal objetivo deste trabalho é realizar a caracterização hidrogeológica da jazida de pirocloro, associada ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, gerando subsídios que orientem o modelamento hidrogeológico conceitual, buscando o aprimoramento do entendimento do fluxo de água subterrânea na área de estudo.

Para que o objetivo principal seja alcançado, faz-se necessário o atendimento às seguintes etapas de trabalho:

- determinar a geometria das unidades litológicas com base em dados gerados a partir de sondagem testemunhada;
- realizar ensaios de campo para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos das litologias na área de estudo;
- efetuar um estudo hidrológico nos córregos que drenam a região;
- executar o inventário e caracterização das nascentes dos córregos;
- amostrar e promover a análise hidroquímica de águas superficiais e subterrâneas;
- realizar um estudo isotópico de águas superficiais e subterrâneas;

Complementarmente, objetiva-se realizar a simulação numérica do fluxo de água subterrânea, testando o ajuste ao modelo conceitual concebido na etapa anterior, criando uma ferramenta de gestão dos recursos hídricos, que poderá ser utilizada em aplicações técnicas no âmbito da Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração.

Nesta fase, as etapas são:

- modelar as características hidrodinâmicas dos litotipos;
- inserir as condições de contorno necessárias ao modelamento e
- calibrar o modelo em regime permanente.



## 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

---

Em projetos de mineração, os estudos hidrogeológicos seguem uma sequência mínima de trabalhos. Segundo Morton & Mekerck (1993), o encadeamento racional dos estudos é importante para que no final se obtenha um modelo conceitual que englobe todas as principais variáveis, e que sua reprodução em modelos numéricos possa acontecer de forma consistente, obtendo as respostas das simulações com maior margem de segurança e assertividade. Assim, para que os objetivos sejam alcançados, os itens seguintes ilustram esta sequência.

Para facilitar a identificação e localização das feições abordadas neste trabalho de pesquisa, o APÊNDICE A traz um mapa geral da área de estudo.

A figura 4.1 mostra uma representação do fluxo de trabalho que passa a ser discutido a partir deste ponto.

### 4.1 - Primeira etapa – Compilação inicial de dados e análises preliminares

Essa etapa consistiu em coletar dados em relatórios de relevância para este estudo, existentes na CBMM, órgãos públicos e outras empresas, bem como um levantamento bibliográfico de dados geológicos e hidrogeológicos locais e regionais, com vistas a definir o estado da arte sobre o tema em questão. Consistiu em realizar a caracterização hidrogeológica propriamente dita, com a definição do modelamento geológico, que serviu de base para o modelo hidrogeológico. Para o modelamento de fluxo, foi realizada a determinação da condutividade hidráulica por meio de testes de campo (testes de *slug*, permeâmetro de Guelph, etc) e os estudos de hidrogeoquímica, além da amostragem e análise de isótopos.

### 4.2 – Segunda Etapa – Avaliação da rede de monitoramento existente

Nesta fase avaliou-se a qualidade das informações históricas geradas pela rede de monitoramento existente na área de estudo.

Os dados de aproximadamente 135 pontos de observação de águas subterrâneas, entre poços de monitoramento e amostragem (PM) e Indicadores de Nível de Água (INA), foram avaliados e compilados em planilhas e bancos de dados específicos. Estes dados possuem uma série histórica de monitoramento iniciada em meados da década de 80. As leituras realizadas nestes pontos foram feitas com medidores de nível elétricos com periodicidade mensal e os resultados foram armazenados em planilhas eletrônicas.



Foram avaliados também os dados de 16 vertedouros fluviométricos (VT) instalados nos cursos de água que drenam a região. Estes equipamentos são monitorados desde o início de 2006.

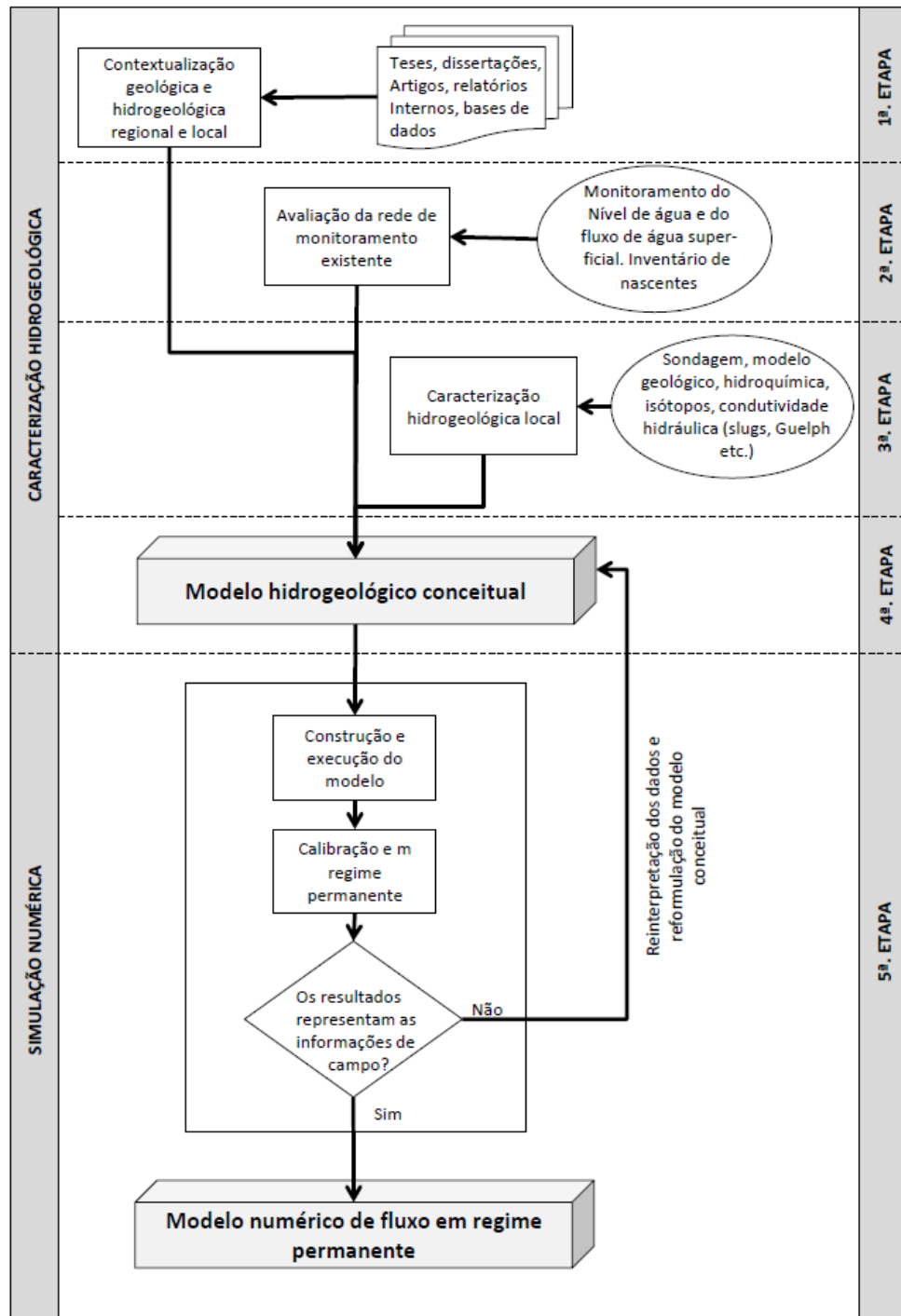


Figura 4.1 – Fluxograma das etapas de trabalho

Tais estruturas são pequenos septos de concreto, instalados perpendicularmente ao curso de água, com chapas de aço, de dimensões pré-determinadas, sendo que com a leitura da lâmina de água que sobre estas aberturas é possível calcular a vazão instantânea no ponto. Podem ser usados para calcular, desde vazões da ordem de 2 a 3 l/s (vertedouros triangulares) até valores de mais de 100 l/s (vertedouros trapezoidais).

As leituras das vazões restituídas nos córregos foram executadas quinzenalmente nos períodos chuvosos (outubro a abril) e mensalmente entre os meses de maio e setembro.

A determinação da vazão nos vertedouros fluviométricos foi feita por meio da leitura da altura da lâmina d'água, tomada a partir do vértice do triângulo ou da base do trapézio, em régua instalada à montante, no remanso formado pelos barramentos.

Nos vertedouros triangulares a vazão é calculada pela fórmula de Gourley & Crimp (1915):

$$Q \left( \text{m}^3/\text{s} \right) = 1.32 * \text{tg} \frac{\alpha}{2} * h^{2.47} \quad (1)$$

Onde:

$h$  = altura da lâmina de água a partir do vértice do triângulo, em metros

$\alpha$  = ângulo de abertura da chapa metálica

Nos vertedouros trapezoidais a vazão é calculada pela fórmula de Cipoletti:

$$Q \left( \text{m}^3/\text{s} \right) = 1.86 * b * h^{3/2} \quad (2)$$

Onde:

$h$  = altura da lâmina de água a partir da base, em metros

$b$  = comprimento da base menor do trapézio, em metros

As avaliações, tanto do nível de água subterrânea, quanto das vazões restituídas pelos córregos, consistiram em validar os dados existentes, no sentido de buscar incongruências, leituras errôneas, lacunas no monitoramento, bem como o expurgo de valores considerados anômalos.

### 4.3 – Terceira Etapa – Caracterização hidrogeológica local

Os métodos que direcionaram a pesquisa estão baseados, principalmente, em estudar e caracterizar as principais unidades aquíferas da região. As técnicas que foram utilizadas são descritas detalhadamente nos próximos itens.

#### 4.3.1 – Sondagem e Modelamento geológico

Os furos de sonda realizados durante as campanhas de pesquisa foram descritos e, de posse dos resultados de descrição geológica, foi possível traçar perfis verticais e horizontais que, por sua vez, foram utilizados para a geração de modelos geológicos tridimensionais, individualizando as principais litologias da área de estudo.

O modelo geológico do CACB foi obtido a partir da interpretação de aproximadamente 500 furos de sonda, com profundidades variando de 80 metros a mais de 600 metros. A interpretação destes dados foi realizada pelo geólogo responsável pela área de geologia e pesquisa mineral da companhia.

Os testemunhos foram descritos de acordo com os intervalos litológicos e de forma a representá-los, com subdivisões complementares baseadas na qualidade, estrutura, textura e magnetismo, utilizando um formulário padronizado. Todas as caixas foram fotografadas.

Os trabalhos de modelagem e interpretação geológica foram realizados utilizando-se o *software Minesight 3D*. Para realização da individualização das litologias, a partir da interpretação dos resultados químicos das amostras, foram construídos perfis verticais ao longo de toda a malha de sondagem. Como a malha apresenta regularidade, tanto no espaçamento quanto na direção dos eixos, os perfis foram projetados de forma a abranger o maior número possível de sondagens, de acordo com a direção e o espaçamento da malha. Portanto, de forma generalizada, foram construídos perfis de direção NE-SW em toda área.

Primeiramente, foram construídas as referências de topo dos perfis, ou seja, linhas ou *strings* projetadas na topografia original, que serviram de base para a construção das poligonais dos litotipos. Com estas linhas de referência, foram criados os polígonos de interpretação para cada litologia.

A partir da interpretação conjunta das seções verticais e das seções horizontais foi possível criar os sólidos para cada litotipo, que simulam a representação tridimensional do CACB.

Estes sólidos foram importados para o *software Visual ModFlow®* 2011.1 e compuseram a base para o modelo hidrogeológico numérico.

#### **4.3.2 – Inventário de nascentes**

O trabalho consistiu em se percorrer a rede de drenagem na área de estudo, identificando os pontos de interesse como surgências e córregos, tomando-se as suas coordenadas com *GPS Garmin*, modelo *GPSmap 62s* e finalmente plotando os pontos na base cartográfica, tendo como referência o sistema UTM, *datum* Córrego Alegre, zona 23S.

Esta etapa teve a duração de 17 dias. Para tal, foi utilizado, como base, um mapa de drenagens, com curvas de nível e imagem de satélite, em escala 1:7.500, abrangendo toda a área de estudo, ou seja, a área da mina e o entorno do empreendimento, margeado pelo anel de quartzitos fenitizados.

As surgências foram identificadas em campo e descritas, tanto do ponto de vista da forma de ocorrência, como das características geológicas e hidrogeológicas de cada ponto. Para o registro foi utilizada uma ficha, com campos para anotações relevantes para o estudo, como descrição da forma de ocorrência da nascente, geologia, localização e parâmetros físico-químicos. Estes parâmetros (pH, Temperatura da água e Condutividade Elétrica) foram medidos com um aparelho portátil, da marca *Hanna Instruments*, modelo HI-98128. Os Sólidos Totais Dissolvidos foram calculados com base nos valores de C.E e Temperatura da água.

#### **4.3.3– Ensaios para determinação da condutividade hidráulica**

Segundo Oliva et al. (2005), os ensaios de permeabilidade podem ser classificados, de acordo com o método utilizado, em ensaios de carga constante e ensaios de carga variável. No primeiro, o nível de água é mantido a uma altura constante, durante todo o teste, injetando-se ou retirando água. As leituras se concentram em determinar a vazão que deve ser injetada ou retirada para manter o nível constante, dentro do furo. Já nos ensaios de carga variável, altera-se o nível a partir de uma posição inicial e observa-se o retorno a esta condição, ao longo do tempo do ensaio.

#### 4.3.3.1) Testes de “Slug”

Os testes de *slug* foram realizados para a determinação da condutividade hidráulica no interior de poços de monitoramento. Os testes foram conduzidos de acordo com o método proposto por Cunningham & Schalk (2011) em nove Indicadores de Nível de Água (INA) instalados na mina.

Segundo o método proposto por Cunningham & Schalk (2011), o teste consiste em modificar instantaneamente o nível de água dentro do poço e monitorar, por meio de um transdutor de pressão, acoplado a uma *data logger*, a recuperação do nível da condição pré-teste. O transdutor de pressão utilizado foi fornecido pela empresa *Schlumberger Water Services* e tem capacidade de leituras com precisão milimétrica, além da possibilidade de programação para leituras com intervalo de meio segundo. Para promover a alteração no nível de água dentro do poço, foi utilizado um *slug* de PVC de uma polegada de diâmetro por 1,20 m de comprimento. Primeiramente o nível estático do poço foi medido, utilizando um medidor de nível manual. O cabo utilizado para descer o *slug* no poço foi medido de acordo com a leitura do nível estático. O transdutor de pressão (*diver*) foi então configurado para realizar leituras com intervalo de 0,5 segundo. O teste foi dividido em duas partes distintas: *slug-in* e *slug-out*, de acordo com o esquema ilustrado na figura 4.2.

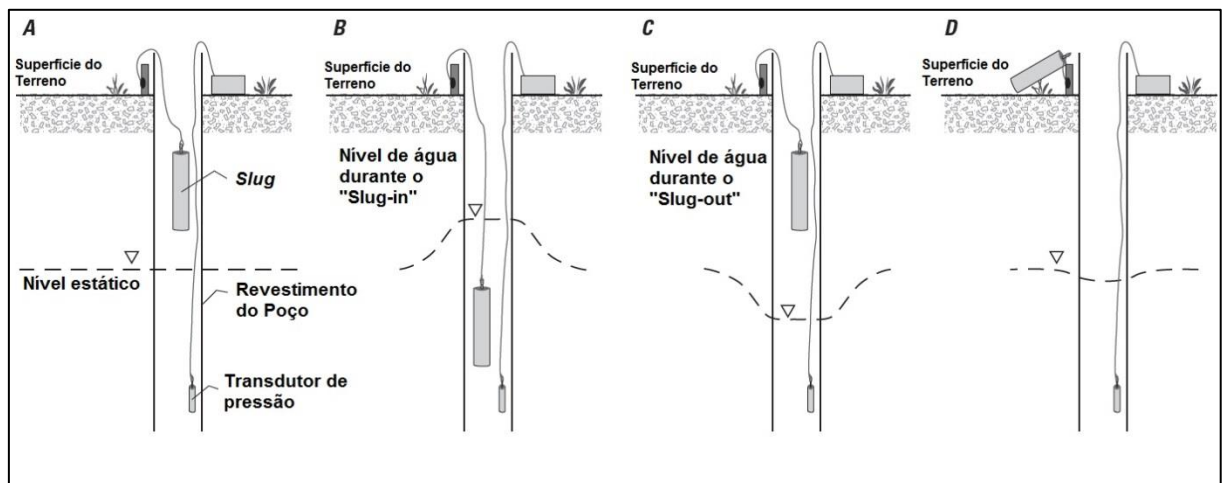


Figura 4.2 - Esquema de realização do “slug test”. (A) *Slug* colocado logo acima do nível de água antes do *slug-in test*. (B) *Slug* submerso abaixo do nível de água durante *slug-in test*. (C) *Slug* removido acima do nível de água durante o *slug-out test*. (D) *Slug* removido do poço após o *slug-out test*. Modificado de Cunningham & Schalk (2011).

A partir dos dados gerados, foi possível realizar uma estimativa da condutividade hidráulica usando métodos analíticos apropriados (HVORSLEV, 1951). Este método foi escolhido por figurar amplamente em estudos deste tipo. A equação é a seguinte:

$$K = \frac{r^2 \ln(Le/R)}{2LeT_0} \quad (3)$$

Onde:

K=condutividade hidráulica (cm/s)

r = raio do revestimento (cm)

R = raio do poço (cm)

Le = comprimento do filtro (cm)

#### 4.3.3.2) Testes de permeabilidade com Permeâmetro de Guelph

O Permeâmetro de *Guelph* (Figura 4.6) foi desenvolvido por Reynolds & Elrick (1983) e foi posteriormente aperfeiçoado na *University of Guelph*, no Canadá, por Reynolds & Elrick (1985). Foi concebido para a determinação da condutividade hidráulica saturada do solo. O permeâmetro de *Guelph* vem sendo aplicado em vários projetos de engenharia, como sistema de irrigação, drenagem e estudos hidrogeológicos em geral. O ensaio é rápido e fácil de ser realizado e é executado aplicando-se um volume de água em um furo aberto por trado, com 50 centímetros de profundidade. O índice de saída de água, o diâmetro do furo e a altura da água no furo são utilizados para a determinação da condutividade hidráulica do solo. Para a realização do teste os seguintes passos foram seguidos:

- a) Localizar os pontos no campo com um GPS RTK da marca JAVAD, modelo TRIUMPH 1.
- b) Fazer uma limpeza superficial utilizando uma retroescavadeira, garantindo que o material “*in situ*” seja exposto.
- c) Realizar a perfuração do solo com um trado Edelman de 3 polegadas de diâmetro até a profundidade de 50 cm.
- d) Montar o equipamento preenchendo-o com água e posicionar o tubo inferior de saída de água no fundo do furo.

- e) Levantar lentamente a ponta de entrada de ar até que a primeira altura de pressão, que será mantida no interior do furo, seja atingida (5 centímetros) ( $H_1$ ).
- f) Selecionar qual a configuração do teste em relação aos reservatórios de água, de acordo com o material a ser ensaiado.
- g) Observar e registrar, a cada 60 segundos, o nível de água no reservatório, utilizando a escala impressa no tubo do reservatório interno.
- h) A taxa de infiltração estável é atingida quando a taxa de queda de água no reservatório for constante em três intervalos de tempo consecutivos.
- i) Repetir o procedimento a partir do item f, levantando-se a ponta de entrada de ar até a altura de 10 cm ( $H_2$ ), encerrando-se assim o teste.

Neste estudo foi utilizado um equipamento da marca Contenco Indústria e Comércio Ltda.

A interpretação dos dados gerados pelo permeâmetro foi realizada utilizando o método teórico em Soil Moisture Corp. (1981), dependendo do reservatório de água utilizado no teste:

$$K = [(0.0041)(X)(R_2) - (0.0054)(X)(R_1)] \quad (4)$$

e

$$K = [(0.0041)(Y)(R_2) - (0.0054)(Y)(R_1)] \quad (5)$$

Onde:

$K$  = Condutividade hidráulica (cm/s);

$R_1$  e  $R_2$  = taxas de infiltração após a estabilização em  $H_1$  e  $H_2$  (cm/s);

$X$  e  $Y$  = Constantes correspondentes aos reservatórios de água utilizados (cm<sup>2</sup>).

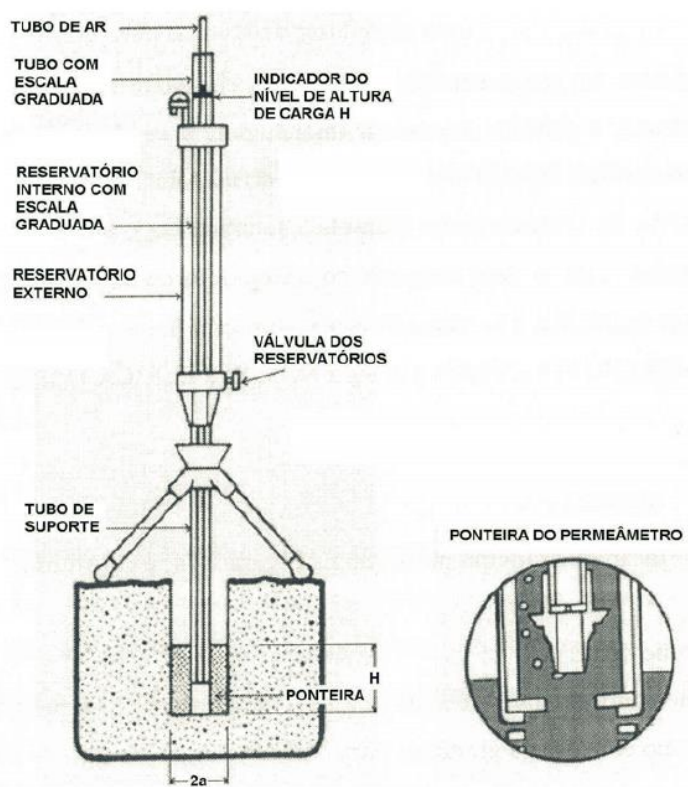


Figura 4.3 - Permeômetro de Guelph. Modificado de Soto (1999).

Este método foi utilizado em ensaios distribuídos de forma a contemplar a caracterização dos solos não saturados, ou seja, os alteritos aflorantes que configuram as primeiras camadas do modelo, além dos solos associados aos xistos e quartzitos fenitizados. A principal limitação do método é a profundidade do ensaio (no máximo 60 centímetros), ou seja, os materiais ensaiados estão na superfície, acima do nível freático. Entretanto, observando-se a correta geração dos bulbos de umidade no solo, bem como a adoção apropriada dos valores de  $\alpha$ , é possível obter resultados representativos para o  $K_{fs}$  da litologia ensaiada (SOTO *et al.*, 2009).

#### 4.3.3.3) Testes hidráulicos em perfurações

No ano de 2011 foi realizada uma série testes hidráulicos em furos de sonda, por empresas contratadas, durante o trabalho de investigação hidrogeológica para a construção da barragem de rejeitos B-8. Os testes de carga constante, carga descendente e testes com obturador foram realizados na porção sudeste da área de estudo, em 10 furos de sonda com profundidade média de 50 metros. Este trabalho foi desenvolvido sob a supervisão do Departamento de Barragens (DEBA) da CBMM. Os ensaios foram realizados nos xistos do



Grupo Ibiá e no anel de quartzitos fenitizados, contemplando tanto os solos e rochas alteradas quanto as rochas sãs.

Testes de carga constante (infiltração): Foram realizados 90 testes hidráulicos durante o avanço das perfurações, a cada 6 metros nas camadas de solo e rocha muito fraturada, nos locais onde não foi possível instalar o obturador. Os testes consistiram em:

- Retirar os tubos de perfuração da sonda de forma a permitir a exposição dos últimos 6 metros das paredes da perfuração.
- Medir o nível de água inicial;
- Instalar a bomba de água e as mangueiras com o hidrômetro na boca da broca;
- Bombear água limpa para dentro do poço até o nível desejado, neste caso o nível da superfície do terreno. Uma vez alcançado este nível, mediu-se a vazão a cada minuto por um tempo de 15 minutos, mantendo o nível de água constante dentro do furo.
- O teste é encerrado quando a diferença de vazões medidas entre cada minuto for constante ou quando apresentarem uma variação menor do que 5%.

A solução analítica adotada para este conjunto de testes foi a de Hvorslev (1951).

Testes de carga descendente: Estes ensaios foram realizados imediatamente após conclusão dos testes de carga constante e consistiram em medir o descenso do nível de água, utilizando uma sonda elétrica modelo Solinst 101, durante 15 minutos. Foram realizados 90 testes de carga descendente, utilizando a solução analítica de Hvorslev (1951).

Testes com Obturador ou Packer (Lugeon test): Foram realizados 8 testes com obturador mecânico em cinco furos de sonda. Estes testes consistiram em:

- Retirar os tubos de perfuração da sonda de forma a permitir a exposição dos últimos 6 metros das paredes da perfuração;
- Medir o nível de água inicial;
- Instalar o obturador mecânico na profundidade desejada, buscando um material pouco fraturado e compacto para evitar problemas de aprisionamento do obturador;
- Injetar água a carga constante em 3 etapas, nas quais se vão subindo as cargas hidráulicas, para logo descender até a carga inicial. O teste envolve manter uma pressão constante (normalmente sobrepressão) enquanto as vazões de

injeção são medidas até se obter um fluxo relativamente constante (variação de 5% entre as medidas). Para as análises foi aplicada a solução proposta por Lugeon (1933).

- O percurso do fluxo vai desde o tanque de água limpa, através da bomba, o medidor de vazão, o manômetro, os tubos de perfuração e os obturadores, até chegar à seção de teste, localizada entre o fundo do furo e o extremo inferior do obturador. Uma válvula de ventilação é instalada antes da entrada do medidor de vazão para controlar as pressões máximas (Figura 4.4).

Estes testes foram realizados em 4 furos de sonda, localizados na região sudeste da área, nos domínios dos xistos do Grupo Ibiá, em profundidades variáveis, de acordo como o perfil do furo, em porções menos alteradas e fraturadas dos xistos. Os ensaios tiveram como objetivo avaliar a condutividade hidráulica desta unidade.

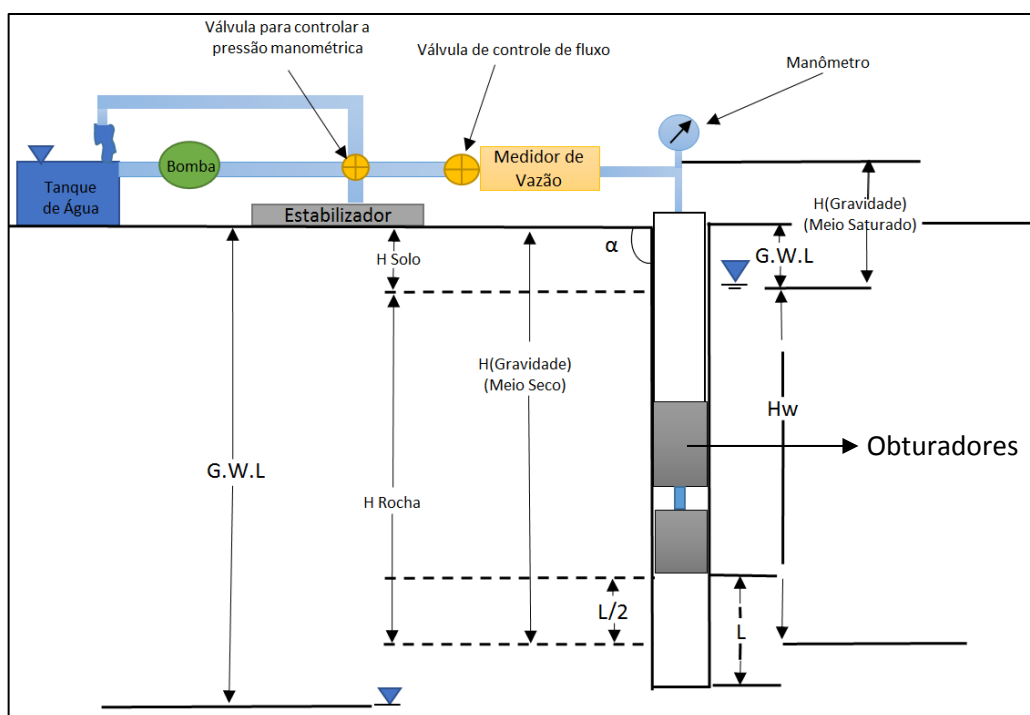


Figura 4.4 - Sistema de ensaio com obturador. MWH (2011)

#### 4.3.4 – Amostragem e análises hidroquímicas

A partir do inventário realizado na etapa 4.3.2, foi possível definir a campanha de estudo hidroquímico. A amostragem e as análises foram realizadas entre os meses de agosto e setembro de 2015. Foram tomadas 36 amostras, divididas da seguinte forma: 10 amostras de água subterrânea; 26 amostras de água de nascentes. Foram coletadas 09 amostras nos

Indicadores de Nível de Água da Mina (INA-01 a INA-09) e uma amostra em um poço de bombeamento PP-11, instalado nas imediações da mina. As amostras dos INAs foram realizadas utilizando-se o método *low flow*, com uma bomba *Sample PRO* da QED e um controlador de pressão MP-50. A amostra no poço PP-11 foi tomada na sua tubulação adutora. Estes pontos são considerados como águas subterrâneas.

As amostras de água de nascentes foram tomadas nas imediações das surgências, nos principais cursos de água que drenam a região. Os pontos de coleta foram eleitos de forma contemplar as principais litologias aflorantes, tanto fora do CACB, quanto no interior do mesmo, distribuídas da seguinte forma: 4 amostras no interior do Complexo (águas interiores); 8 amostras nas bordas da intrusão (águas do anel de quartzitos); 13 amostras na porção exterior ao Complexo (águas exteriores ao Complexo).

A coleta e análise das amostras foram realizadas pelo laboratório da *Merieux Nutriscience*, baseado na cidade de Uberlândia – MG.

Os métodos de coleta e análise constam do *Standard Methods for examination of Water and Wastewater (SMWW)*, em sua 22ª edição (APHA, 2012). Foram analisados os principais cátions (cálcio, magnésio, sódio, potássio) e ânions (cloreto, carbonato, bicarbonato, amônia, nitrito, nitrato, sulfato, fluoreto), bem como os metais totais e dissolvidos (alumínio, arsênio, bário, cobre, cobalto, chumbo, cádmio, cromo, ferro, manganês, mercúrio, níquel, zinco, sulfetos, urânio, prata e selênio). O quadro 4.1 resume as referências metodológicas utilizadas nas análises das amostras.

As determinações dos parâmetros de campo: temperatura do ar, temperatura da água, oxigênio dissolvido, turbidez, condutividade elétrica, Eh, pH, foram obtidos utilizando-se uma sonda multiparâmetros da marca QED, modelo MP-20.

Quadro 4.1 – Referências metodológicas das análises hidroquímicas

Ensaio químico	Referências Metodológicas	Método
Amostragem	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 1060/9060 e POP LB 010 rev.14.	-
Turbidez	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2130 B	Nefelométrico
Potencial Redox	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2580 B	Leitura direta, Sonda QED
OD	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500O G	Titulometria
Nitrato	POP PA 124 - Rev.08	Kit colorimétrico
Nitrito	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500 NO2- B	Titulometria
Nitrogênio Amoniacal	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500 NO3- F	Titulometria
Condutividade	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2510 B	Leitura direta, Sonda QED
Cor	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2120 C	Espectrofotometria
pH	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500H+ B	Titulometria
Sulfato	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500 SO42-	Titulometria
Cloreto	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500Cl- D	Titulometria
Sulfeto	Determinação: SMWW, 22ª Edição, 2012, Método 4500 S-2 D / Preparo: SMWW, 22ª Edição, 2012, Método 4500 S-2 C	Colorimétrico em extratos aquosos
Metais (ICP-MS) Totais e dissolvidos	Determinação: SMWW, 22ª Edição, 2012, Método 3125 B / Preparo: EPA 3010 A/1992 e EPA 3005/1992	Espectrometria de massa/ ICP-MS
Fluoreto	POP PA 161 - Rev. 04	Colorimétrico
Temperatura	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 2550 B	Leitura direta, Sonda QED
Fosfato	SMWW, 22ª Edição, 2012 - Método 4500 P E	Titulometria

#### 4.3.5 – Balanço iônico

O balanço iônico foi efetuado nas planilhas originais dos dados, utilizando a análise dos miliequivalentes e os erros estimados a partir da seguinte equação:

$$(\Sigma \text{Cátions} - \Sigma \text{Ânions}) [(\Sigma \text{Cátions} + \Sigma \text{Ânions}) \times 100] = \text{Erro do balanço} \quad (6)$$

Onde:

$\Sigma \text{Cátions}$  = concentração dos íons com carga positiva, em meq/L;

$\Sigma \text{Ânions}$  = concentração dos íons com carga negativa, em meq/L.

As amostras que não atenderam o balanço não foram utilizadas no estudo. Custódio e Llamas (1983) explicam que a diferença entre as somatórias de cátions e ânions pode ser interpretada como a acumulação de erros na determinação de cada variável e por não levar em consideração as contribuições iônicas menores, mas que podem interferir no fechamento do balanço.

#### 4.3.6 – Amostragem e análises de Isótopos

O trabalho de caracterização isotópica consistiu na coleta de amostras em pontos de água de nascentes e água subterrânea, realizada no mês de janeiro de 2016.

Para tanto, foram selecionados sete pontos de amostragem, os quais escolhidos de forma a contemplar as águas que fluem pelas litologias da área de estudo, além de complementar o estudo de isótopos realizado por Raposo (2011). Posteriormente à campanha de amostragem, foi coletada uma amostra de água da chuva, que foi analisada para os isótopos de oxigênio-18, deutério e trítio.

Os pontos selecionados para amostragem incluem uma nascente (NA-41) e dois INAs (INA-05 e INA-06) localizados na parte interna do anel de quartzitos fenitizados, além de outras 3 nascentes (NA-1, NA-27 e NA-13) e um lago (B7) localizados na parte externa do CACB. O ponto NA-41, representado pela fonte Dona Beja, foi também amostrado por Raposo em 2011. Assim, esta amostra serviu como um ponto de controle entre os dois estudos. Os resultados deste trabalho foram avaliados em conjunto com as amostras analisadas por Raposo (2011) em 15 pontos, incluindo poços, nascentes e lagos.

As amostras foram armazenadas em frascos dedicados a cada grupo de parâmetros a serem analisados. A campanha realizada incluiu ainda a medição em campo do pH, condutividade elétrica e temperatura. As amostras coletadas foram enviadas para análise de isótopos no Laboratório de Isótopos Ambientais (*Environmental Isotopes Laboratory - EILAB*) da *Waterloo University*, no Canadá. As amostras foram também analisadas para parâmetros físico-químicos no laboratório da *Merieux Nutrisciences*. Esta análise hidroquímica serviu de controle para gerar subsídios para a interpretação dos dados de isótopos.

Os parâmetros analisados, bem como os métodos de análise são listados a seguir:

##### a) Isótopos:

- $^{18}\text{O}$ , Deutério, Trítio, Carbono-13 e Carbono-14.

As relações  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $^{17}\text{O}/^{18}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  das amostras foram medidas utilizando o *Liquid Water Isotope Analyser (LWIA)*, modelo T-LWIA-45-EP, que possui precisões de  $\delta^2\text{H} = \pm 0.3\text{‰}$  e  $\delta^{18}\text{O} = 0.1\text{‰}$ . Aproximadamente 1000 nL de água são injetados na porta do septo aquecido. Após a injeção, a água rapidamente vaporiza e é expandida dentro da célula de laser do LWIA. Cada amostra é injetada oito vezes. As duas primeiras são descartadas como condicionamento do aparelho. O resultado é a média das seis amostras remanescentes. Diferentemente das técnicas aplicadas em espectrometria de massa, as moléculas de água não

são convertidas em outros gases e são medidas diretamente por um sistema de Laser ICOS (*Off-Axis Integrated-Cavity Output Spectroscopy*). Todas as amostras são filtradas a 0,45 micron. O controle de qualidade é mantido analisando-se uma suíte de padrões de água de referência mundial como VSMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*) e o VSLAP (*Vienna Standard Light Antarctic Precipitation*) da *International Atomic Energy Agency* (IAEA). Maiores informações podem ser obtidas em Penna *et al.* (2012), Lis *et al.* (2008) e Berman *et al.* (2013).

A técnica de análise usada para o Trítio foi a LSC (*Liquid Scintillation Counting*) ou contagem de cintilação líquida, utilizando um *Tri Carb Liquid Scintillation Analyser*, modelo 1500 da marca *Packard*. Para que maiores precisões e limites de detecção mais baixos sejam alcançados, as amostras são enriquecidas 15 vezes por eletrólise e então mensuradas. O limite de detecção para as amostras enriquecidas é de 0,8 TU (*Tritium Unit*). O laboratório utiliza um “cocktail” de cintilação, o qual possui uma alta capacidade de carga para a água com um baixo *background*. Cada amostra inclui 3 *backgrounds* (água de um poço próximo a Newmarket, Ontario, com trítio não detectável), um monitor de longo prazo (água deionizada em laboratório) e um padrão rastreável NIST-4926-E, o qual foi calibrado com um padrão NIST-SEM-4361B-21. Este método está descrito em Taylor (1977) e Packard (1986).

Na análise de  $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ , o laboratório converte as amostras (carbono inorgânico dissolvido, ou sua sigla em inglês DIC) em dióxido de carbono puro, que é aprisionado em tubos de vidro de 6 mm. Para tal, são necessários 3 mg de carbono para se realizar a análise padrão. O dióxido de carbono é então reduzido a grafite e as amostras grafitizadas são analisadas em um Acelerador *Pelletron 1.5SDH-1* da marca *National Electrostatics Corporation*. Este equipamento produz leituras com 0,3% de acurácia. Por convenção, cada resultado determinado como mais velho do que 45.000 anos antes do presente são reportadas “>45.000” e as amostras com atividade negativa são reportadas como “Modernas”. O método é descrito em Gupta & Polach (1985) e em Stenström *et al.* (2011).

#### b) Cálculos de Índice de Saturação

Para o cálculo de atividades e índices de saturação das amostras, utilizou-se o *software* de modelagem hidrogeoquímica PHREEQC (PARKHURST & APPELO, 1999), em conjunto com o banco de dados termodinâmicos phreeqc.dat, incluído no pacote deste programa.

#### 4.4 – Quarta Etapa – Desenvolvimento de um modelo hidrogeológico conceitual preliminar

Os dados obtidos nas etapas anteriores, compilados e tratados, serviram de base para a elaboração de um modelo conceitual preliminar. No modelo conceitual foram definidos os principais processos que controlam o fluxo de água subterrânea na área de estudo, bem como as características hidroquímicas e isotópicas, que podem esclarecer as particularidades do fluxo subterrâneo. O modelo serviu como subsídio para o entendimento do arcabouço hidrogeológico da área de estudo e indispensável para que o modelo numérico fosse desenvolvido.

#### 4.5 – Quinta Etapa – Modelo hidrogeológico Numérico computacional

Tendo como base o modelo hidrogeológico conceitual, a próxima etapa foi desenvolver um modelo numérico de fluxo tridimensional pelo método das diferenças finitas (McDONALD & HARBAUGH, 1988) utilizando o *software Visual ModFlow®* 2011.1.

##### 4.5.1 – Seleção dos códigos numéricos

O código selecionado para este estudo foi o das diferenças finitas (*MODFLOW*), desenvolvido pela USGS no final da década de 1980. O *software Visual ModFlow* vem sendo desenvolvido desde então, buscando o aperfeiçoamento e desenvolvimento de novos módulos.

O processo de escoamento da água subterrânea é descrito pela equação geral de fluxo (BEAR, 1972; FETTER, 1993):

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) + R_v \quad (7)$$

que é válida para aquíferos tridimensionais, onde:

$S_s$  = coeficiente de armazenamento específico (l/m)

$h$  = carga hidráulica (m);

$\nabla$  = nabla – indicador de divergente;

$\mathbf{K}$  = tensor de condutividade hidráulica nas três dimensões (x, y e z) (m/s);

$R_v$  = termo de fonte (l/s).

Esta equação geral pode ser simplificada, para o caso da simulação de aquíferos livres ou confinados, em regime permanente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( hK_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( hK_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( hK_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = R_v \quad (8)$$

A partir desta equação, no módulo de processamento escolhido, as cargas hidráulicas e os vetores de velocidade são calculados, baseados nas condições de contorno e nas propriedades físicas levantadas na caracterização hidrogeológica. Para a solução do modelo em regime permanente foi utilizado o solver SAMG v. 1.19.01, acoplado ao *software Visual ModFlow*® 2011.1.

#### **4.5.2 – Definição do domínio do modelo e sua discretização**

O domínio do modelo corresponde à área que se pretende representar e deve ser definida baseada nos divisores do fluxo subterrâneo. Neste estudo, o domínio foi definido abrangendo os limites norte e sul do CACB, representados pelo anel de quartzitos fenitizados, a cava da mina do Barreiro a oeste e a barragem B7, a leste. Entende-se que este limite abrange todas as áreas necessárias ao posterior uso do modelo, como ferramenta de gestão de recursos hídricos.

O modelo possui 8 Km de largura por 9,4 Km de comprimento, cobrindo um área de 75,2 Km<sup>2</sup>. A discretização foi feita em células de no máximo 180 m por 140 m e detalhada na porção interior do CACB, em células de 30 m por 30 m. Dessa forma, o modelo possui 221 linhas, 250 colunas e 33 camadas.

#### **4.5.3 – Reprodução da geologia no Visual ModFlow**

Para representar a geologia do CACB no modelo matemático, os dados gerados a partir da modelagem geológica, realizada no *software MineSight*, foram importados para o *software PETREL E&C* para reproduzir a geometria dos corpos geológicos. Posteriormente, as informações foram exportadas para a construção do modelo matemático no *software Visual ModFlow*.



#### 4.5.4 – Condições de contorno

As condições de contorno, que controlam a entrada e saída de água no modelo numérico, foram divididas em quatro grupos principais:

- *Zero Flow*: Corresponde aos limites da área inativa do modelo, onde não há fluxo entrando ou saindo das *layers* do modelo. Foi definida com base nas microbacias dos córregos que drenam a região e que, além disso, não possuíam equipamentos para medição dos deflúvios, não sendo possível calibrar as descargas do aquífero.
- *Recharge*: A recarga representa a fração da pluviometria que infiltra pelas *layers* do modelo e alcança os aquíferos. Trata-se de um parâmetro somente de entrada no modelo. A recarga aplicada às *layers* obedeceu, neste estudo, aos dados gerados a partir da avaliação da flutuação sazonal dos níveis de água utilizando o método WTF (*Water Table Flutation*). Este procedimento se baseia no pressuposto de que o aumento do nível de água em aquíferos livres é devido à água precipitada que infiltra e atinge o nível freático. (HEALY & COOK, 2002; SCANLON *et al.*, 2002). Esta metodologia não considera os mecanismos de fluxo que governam a passagem da água pela zona não saturada. Admite ainda que todos os outros membros do balanço hídrico (fluxo de base, evapotranspiração e saída para outras bacias) são nulos. A equação é a seguinte:

$$R = Sy \frac{dh}{dt} \cong Sy \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (9)$$

Onde:

R = Recarga (L/T);

Sy = Coeficiente de rendimento específico (adimensional);

h = altura do nível de água (L);

t = tempo (T).

A equação foi aplicada em cada evento de elevação de água em seis poços, obtendo-se a recarga total ou bruta, conforme definido por Healy & Cook (2002). Para determinar a diferença do nível de água ( $\Delta h$ ), avalia-se a diferença entre o pico de elevação e o ponto mais baixo a curva de recessão anterior, extrapolada até o momento do pico, conforme pode ser visto na figura 4.5.

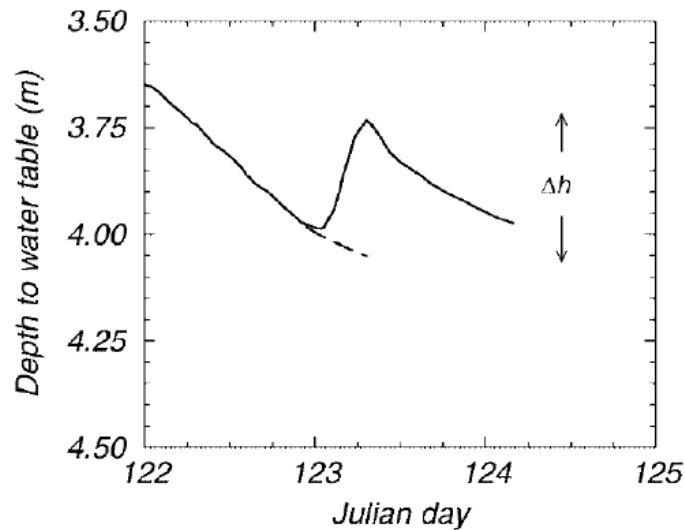


Figura 4.5 – Determinação de  $\Delta h$  pela extrapolação da curva de recessão anterior ao pico de elevação. (HEALY e COOK, 2002).

- *Módulo Rivers*: Os córregos que drenam a região de estudo foram representados usando as células que levam em consideração a elevação topográfica de cada trecho, bem como a condutância do córrego. Este parâmetro foi estimado para atender aos deflúvios observados nos vertedouros fluviométricos.
- *Módulo Drains*: Os drenos foram aplicados às células que representam os locais das nascentes mapeadas no inventário. Este tipo de condição de contorno apenas retira água do modelo matemático. Analogamente ao procedimento adotado na condição de contorno *Rivers*, a condutância foi estimada para atender aos deflúvios monitorados com os vertedouros fluviométricos.

#### 4.5.5 – Zone Budgets

As *Zone Budgets*, ou zonas de balanço hídrico calculam os balanços sub-regionais nas simulações dos modelos em regime permanente e transitório. Este cálculo é feito tabulando-se os dados de balanço que o *ModFlow* produz, usando a opção de avaliação célula a célula. O modelador deve apenas especificar as sub-regiões e o balanço é realizado para cada uma delas. De modo geral, estas sub-regiões representam as microbacias acima dos pontos de monitoramento por vertedouros fluviométricos.

#### ***4.5.6 – Calibração do modelo***

A calibração é o processo usado para ajustar os parâmetros do modelo, com vistas a alcançar o melhor nível de correspondência entre o fluxo modelado e o sistema de fluxo natural. O modelo matemático é considerado calibrado quando ele pode reproduzir, em um nível aceitável, a carga hidráulica e o sistema de fluxo. Para isso, foram utilizadas as leituras de 135 poços, inseridos no modelo, com os dados de carga hidráulica referentes a agosto de 2006. Este período foi escolhido para a calibração em regime permanente, após a avaliação da rede de monitoramento de nível, compilados desde a década de 80. Nesta avaliação foi possível perceber que o nível de água regional se manteve descendente desde o início do monitoramento, entrando em equilíbrio em meados de 2006. Este comportamento pode ser explicado pelos trabalhos de rebaixamento executados na Mina do Barreiro, na época, operada pela Fosfértil. Com a descontinuação das atividades de rebaixamento em 2006, o nível de água regional entrou em equilíbrio. Portanto, a condição de regime permanente foi modelada levando-se o ano de 2006 como referência.

## 5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

---

### 5.1 – Modelamento geológico

De acordo com as descrições geológicas realizadas pela equipe de pesquisa mineral da CBMM em sondagens e a sua posterior representação em três dimensões, foi possível modelar as unidades litológicas que fazem parte do CACB e seus arredores. As principais unidades observadas são descritas a seguir (DEHO, 2014).

#### a) Solo (mineralizado e não mineralizado ao nióbio)

É um horizonte de solo de coloração avermelhada (latossolo) na superfície, passando a amarelo em profundidade, cobrindo quase toda a porção interna da intrusão. Possui poucos metros de espessura e aparece capeando a maior parte do CACB, exceto nas porções onde os Alteritos estão expostos, por conta das atividades minerárias.

Trata-se de um aquitardo, argiloso a pouco siltoso, com espessuras variando de poucos metros a dezenas de metros.

#### b) Alteritos

É o produto da alteração dos carbonatitos. De acordo com a mineralogia pode ser separado entre alterito laranja e alterito marrom. O alterito laranja apresenta-se friável, geralmente muito fino (silto-arenoso), enriquecido em nióbio, barita e fosfatos de terras raras (monazita), com teores desprezíveis de apatita. O alterito marrom é formado por um pacote friável e oxidado, com granulometria variando de argila a areia média, frequentemente com intercalações de canga / sillexito. Os teores de apatita desta unidade são tais que o configuram como minério de fosfato apatítico. Os alteritos configuram-se como um aquífero granular, devido, principalmente, aos pacotes arenosos e encontram-se expostos à superfície em função das atividades de lavra da CBMM e da Vale Fertilizantes. Ressalta-se que a interpretação apresentada considera o alterito laranja e o alterito marrom como sendo uma única unidade hidroestratigráfica. Esta interpretação baseia-se no entendimento de que as diferenças, entre os dois tipos residem apenas na composição química, não havendo, portanto, indicações de diferenças significativas nas características hidrodinâmicas destes.

### **c) Saprolito**

Esta unidade é caracterizada por materiais saprolíticos, menos intemperizados em comparação à unidade Alterito. Apresenta-se, geralmente, com granulometria fina e coloração cinza esverdeada, às vezes verde clara, de composição micácea e carbonática, formando a transição dos alteritos para a rocha fresca.

É composto por materiais ricos em minerais micáceos (flogopita), com variações de coloração entre marrom e verde, podendo apresentar na sua constituição, carbonatos na forma de lentes ou disseminados na matriz micácea, juntamente com magnetita.

Trata-se de um aquífero que ocorre logo acima da rocha sã e possui alguns metros de espessura.

### **d) Rocha carbonatítica sã**

É uma rocha compacta a semi-compacta, formada principalmente por carbonatitos dolomíticos, brechados, geralmente brancos, branco acinzentados ou esverdeados, glimeritos e brechas cinza esverdeadas. Essas rochas apresentam também intercalações silicificadas (coloração marrom), sendo constituídas pelos seguintes minerais: calcita, dolomita, apatita, flogopita, pirita, magnetita.

A unidade Rocha sã é constituída de flogopito e carbonatito de forma indiscriminada. Apresenta-se fraturada, mas forma um aquífero fissural pouco expressivo, que, segundo Raposo (2011), pode apresentar condições locais de artesianismo.

### **e) Quartzitos fenitizados alterados e não alterados**

A auréola de fenitização é marcada pela presença de arfvedsonita, feldspato alcalino, calcita, barita, piroxênio sódico e apatita e silexitos nas encaixantes, além do intenso faturamento.

Na superfície, a alteração se mostra mais proeminente, como um horizonte arenoso, que aflora nas bordas da intrusão. É um aquífero livre e funciona como uma importante zona de recarga, que abastece tanto a parte interna da intrusão, quanto às drenagens que nascem nas cabeceiras do domo e vão em direção à rocha encaixante.

A porção não alterada desta unidade é um aquífero fissural, que está associado a sistemas de falhas e fraturas de grande profundidade.

Cabe ressaltar que a unidade representada pelos quartzitos fenitizados apresenta uma inclinação para atender ao modelo proposto por Rodrigues *et al.* (2006), que realizaram

modelagem magnética e gravimétrica do CACB, verificando que este apresenta formato de taça, afunilando até a profundidade de 1800 m.

**f) Xistos alterados (solo residual/saprolítico)**

O solo residual/saprolítico de xistos ocorre com granulometria silto-argilosa a silto-arenosa. É micáceo e sedoso, com presença de pedregulhos, finos a médios, de quartzo na forma de lentes milimétricas a centimétricas, paralelas à foliação, preservadas em algumas porções. Observam-se também deslocamentos paralelos à foliação e até mesmo alguns vazios, normalmente associados a erosões próximas às lentes de quartzo. São de coloração marrom avermelhado a rosado, com porções esverdeadas e escuras nas regiões de estruturação preservada. As rochas originais desse tipo de solo residual são micaxistos e filitos.

**g) Xistos fraturados e não alterados**

Os xistos fraturados e não alterados são caracterizados como xistos cinza esverdeados a acinzentados, muito alterados a moderadamente alterados, pouco resistentes a resistentes e muito fraturados a fraturados. Em algumas regiões de xistos silicificados, observa-se a presença de poros de dissolução. Essas rochas fraturadas ocorrem em um horizonte na ordem de 15 a 30 metros de espessura, atingindo profundidades de até 50 metros. Os xistos configuram-se como um aquífero fissural de pouca expressão regional.

A figura 5.1 mostra o modelo tridimensional determinado.

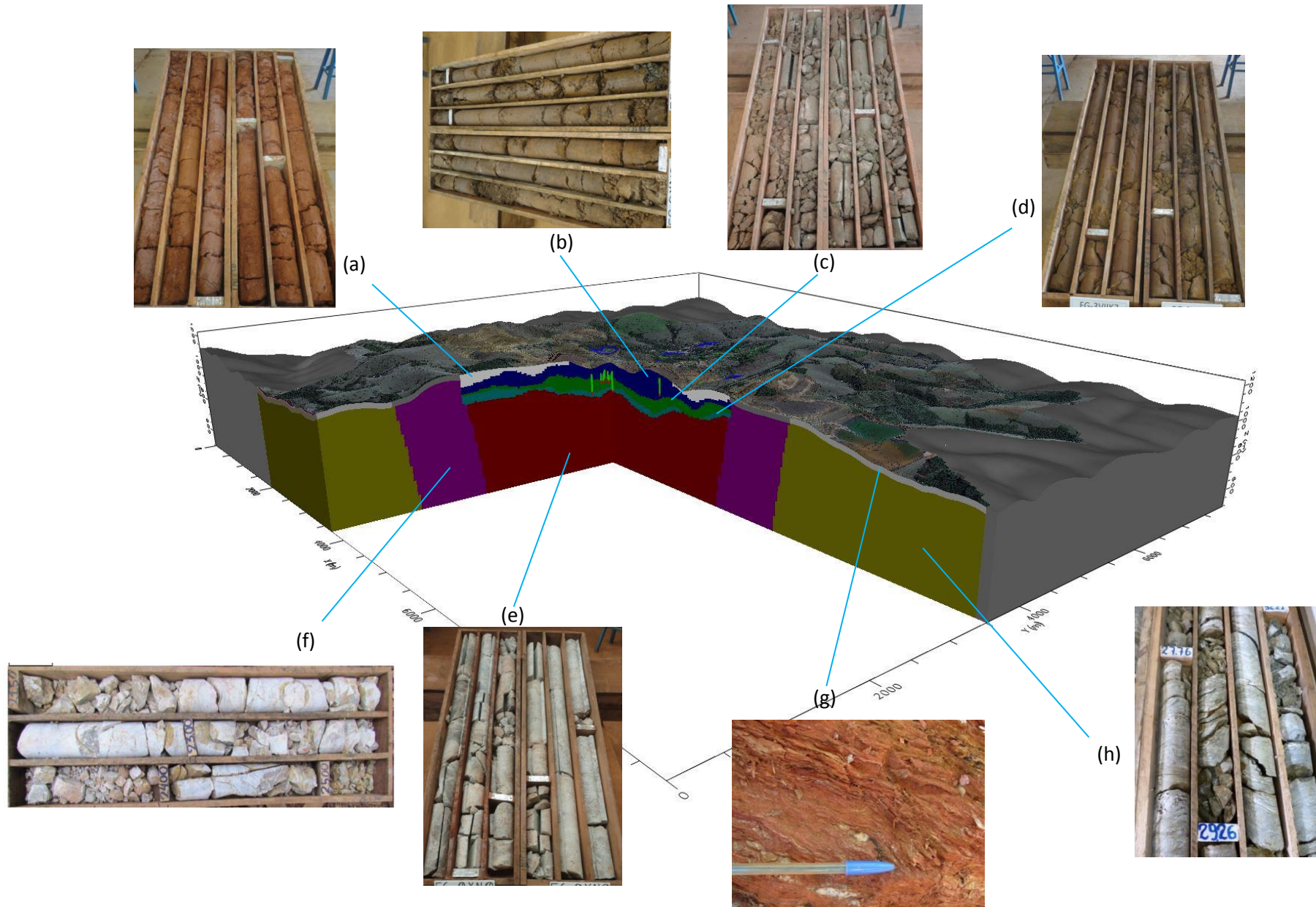


Figura 5.1 - Modelo geológico tridimensional mostrando exemplos de furos de sonda de cada litotipo. (a) Solos; (b) e (c) Alteritos laranja e marrom; (d) Saprolitos; (e) Rocha carbonatítica sã; (f) Quartzitos fenitizados; (g) Xistos alterados/fraturados; (h) Xistos não alterados.

## 5.2 - Determinação da Condutividade Hidráulica

### 5.2.1 – Slug Tests

Os testes de *slug* foram realizados segundo o em nove poços de monitoramento ou Indicadores de Nível de Água (INAs), distribuídos na mina, de acordo com o mapa da figura 5.2. Ressalta-se que todos os INAs foram instalados em furos de 6 polegadas de diâmetro e revestidos com tubos lisos e filtros de PVC geomecânico de 2 polegadas de diâmetro. Os perfis construtivos dos equipamentos encontram-se no Apêndice B. Os filtros foram distribuídos, de maneira uniforme, a partir da profundidade do nível de água atingido. Portanto, os testes refletem valores mais gerais dos alteritos. É importante ressaltar que, com exceção do INA-05, todos os equipamentos foram instalados no alterito laranja. O INA-05 atravessou, na maior parte, o alterito marrom.

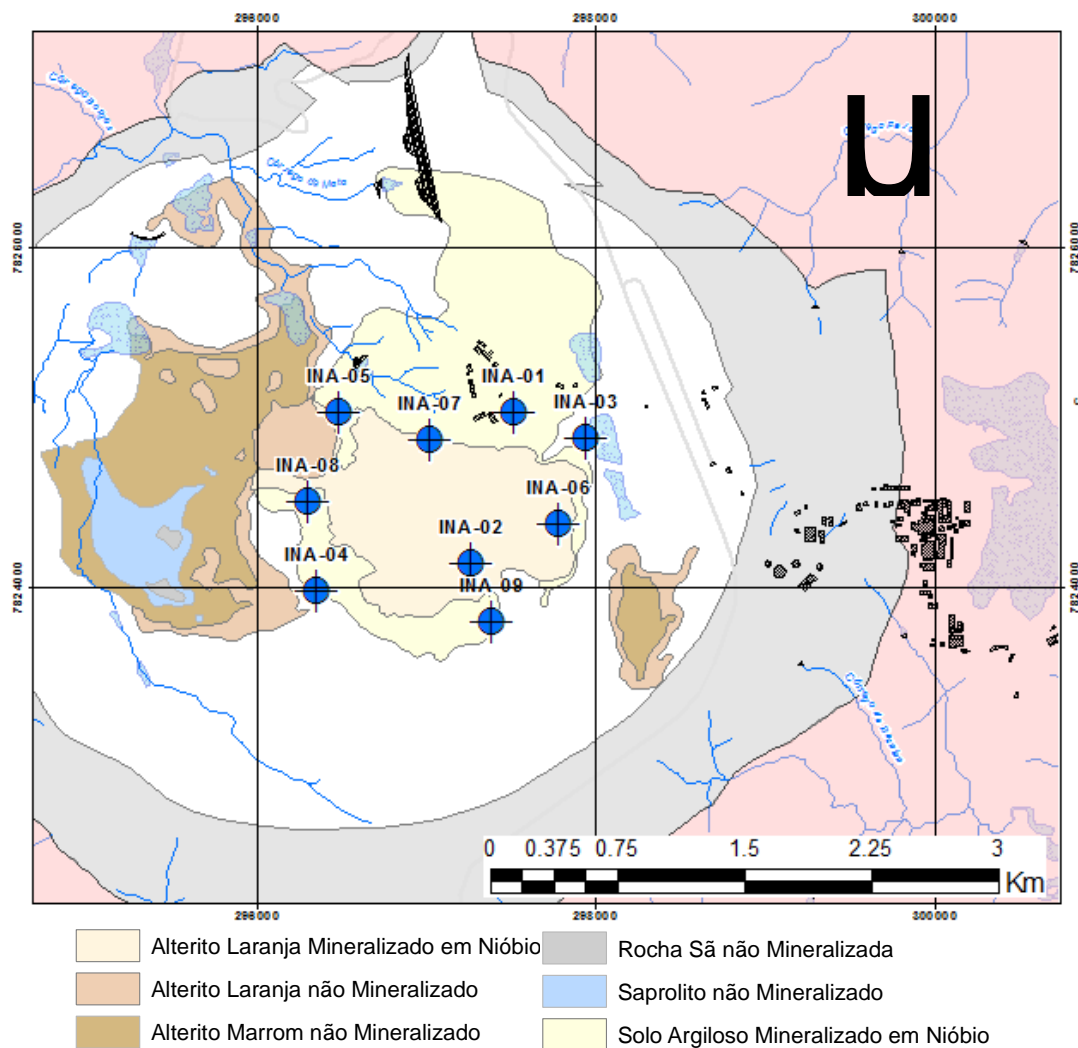


Figura 5.2 – Mapa de localização dos Indicadores de Nível de Água (INAs)



De acordo com o método proposto por Cunningham & Schalk (2011), o volume de água deslocado pelo *slug*, durante o teste, é de 0,623 litros, o que equivale a um incremento de aproximadamente 30 centímetros no nível do INA. Estas mudanças foram registradas pelo transdutor de pressão nas duas etapas do teste e compiladas no *software Diver Office 2013.1*, conforme pode ser visto no exemplo do teste no INA-01 (Figura 5.3).

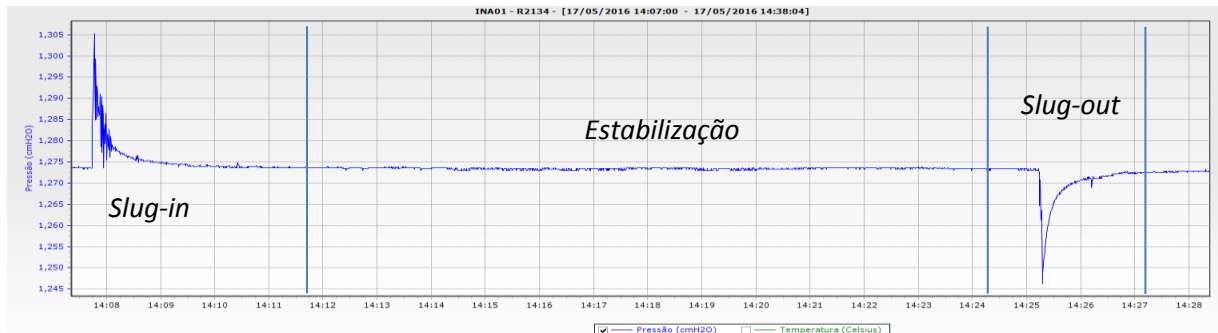


Figura 5.3 - Gráfico do *Diver Office* mostrando as etapas do “slug-test” (INA-01).

Para a interpretação do teste foi utilizado o software *Aquifer Test 2014.1*. Após entrar com os dados construtivos de cada poço, os intervalos de *slug-in* e *slug-out* foram filtrados e a mudança na carga hidráulica foi inserida no *software* (Figura 5.4).

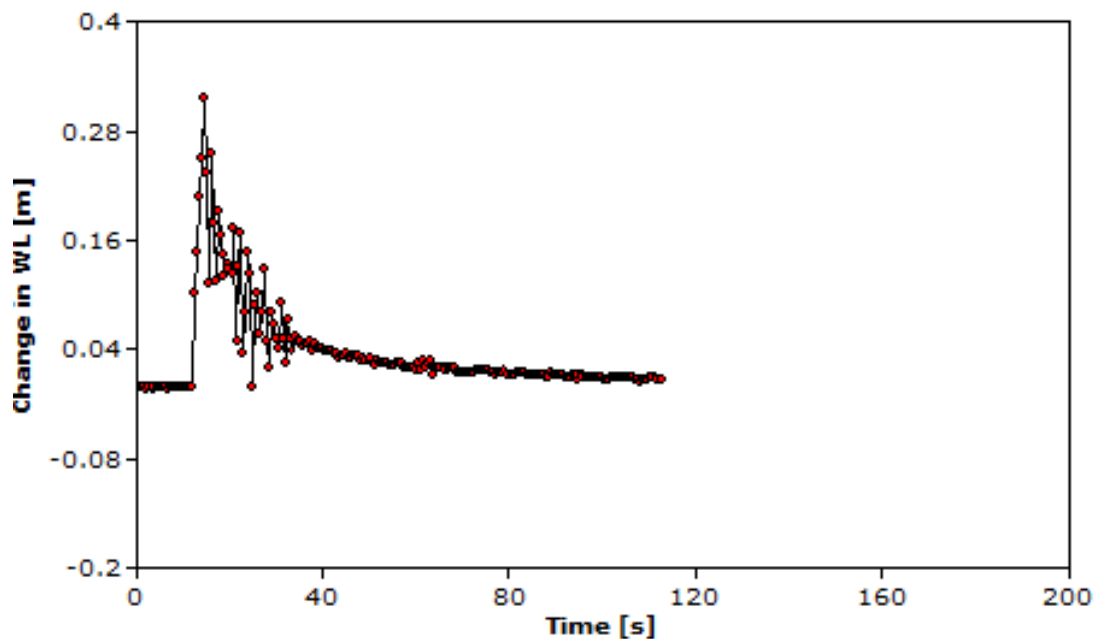


Figura 5.4 - Interface do software “*Aquifer Test*”, mostrando a entrada de dados da mudança na carga hidráulica durante o *slug-in*.

O método de análise utilizado foi o proposto por Hvorslev (1951). A reta de melhor ajuste no gráfico  $h/h_0$  (m) x  $t$  (s) define o  $h_0$ , que aplicado na equação de Hvorslev (1951) resulta no valor de  $K$ , conforme exemplo da figura 5.5.

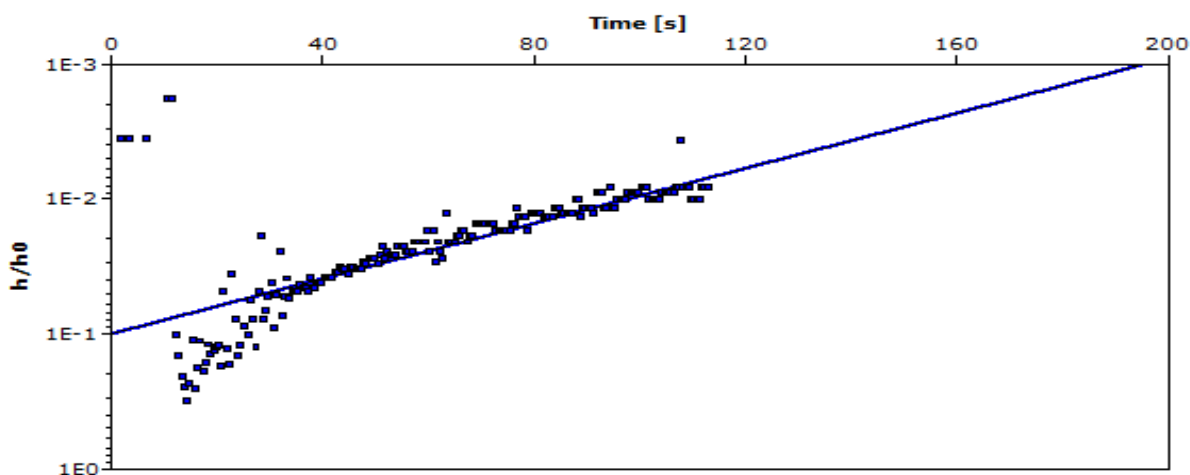


Figura 5.5 - Exemplo de análise mostrando reta de melhor ajuste no gráfico  $h/h_0$  x  $t$ . (INA-01)

A condutividade hidráulica se distribui de maneira relativamente uniforme na área da mina, com valores entre  $1,06 \times 10^{-6}$  m/s e  $2,60 \times 10^{-5}$  m/s (Tabela 5.1). A média geométrica do *slug-in* é igual a  $2,64 \times 10^{-6}$  m/s e a média geométrica do *slug-out* é igual a  $3,51 \times 10^{-6}$  m/s. O valor da média geométrica geral é igual a  $3,04 \times 10^{-6}$  m/s

Tabela 5.1 – Resultados dos slug-tests

INA	Nível Estático (m)	Prof. Diver (m)	Kslug-in (m/s)	Kslug-out (m/s)	Litologia
INA-01	62.72	66.33	$3,93 \times 10^{-6}$	$1,96 \times 10^{-6}$	Alterito laranja
INA-02	18.74	38.11	$1,14 \times 10^{-6}$	$6,15 \times 10^{-6}$	Alterito laranja
INA-03	17.65	25.27	$1,29 \times 10^{-5}$	$2,60 \times 10^{-5}$	Alterito laranja
INA-04	53.17	58.84	$1,32 \times 10^{-6}$	$1,28 \times 10^{-6}$	Alterito laranja
INA-05	46.26	55.06	$2,63 \times 10^{-6}$	$3,50 \times 10^{-6}$	Alterito marrom
INA-06	36.85	40.00	$2,72 \times 10^{-6}$	$3,80 \times 10^{-6}$	Alterito laranja
INA-07	63.23	79.71	$3,35 \times 10^{-6}$	$5,74 \times 10^{-6}$	Alterito laranja
INA-08	63.67	79.70	$1,66 \times 10^{-6}$	$2,51 \times 10^{-6}$	Alterito laranja
INA-09	69.06	79.15	$2,02 \times 10^{-6}$	$1,06 \times 10^{-6}$	Alterito laranja

Para Feitosa *et al.* (2008), esta faixa de valores de condutividade abrange os materiais compreendidos por areias finas e siltosas, o que reflete a condição dos materiais ensaiados. Além disso, conforme mostrado no gráfico da figura 5.6, a condutividade hidráulica diminui

sensivelmente à medida que a profundidade aumenta. É provável que o grau de alteração do minério, que tende a diminuir com a profundidade, possa interferir na permeabilidade do meio. Além disso, o gráfico também mostra que a condutividade hidráulica na etapa *slug out* é, na maior parte dos ensaios, ligeiramente maior que aquela obtida no *slug in*.

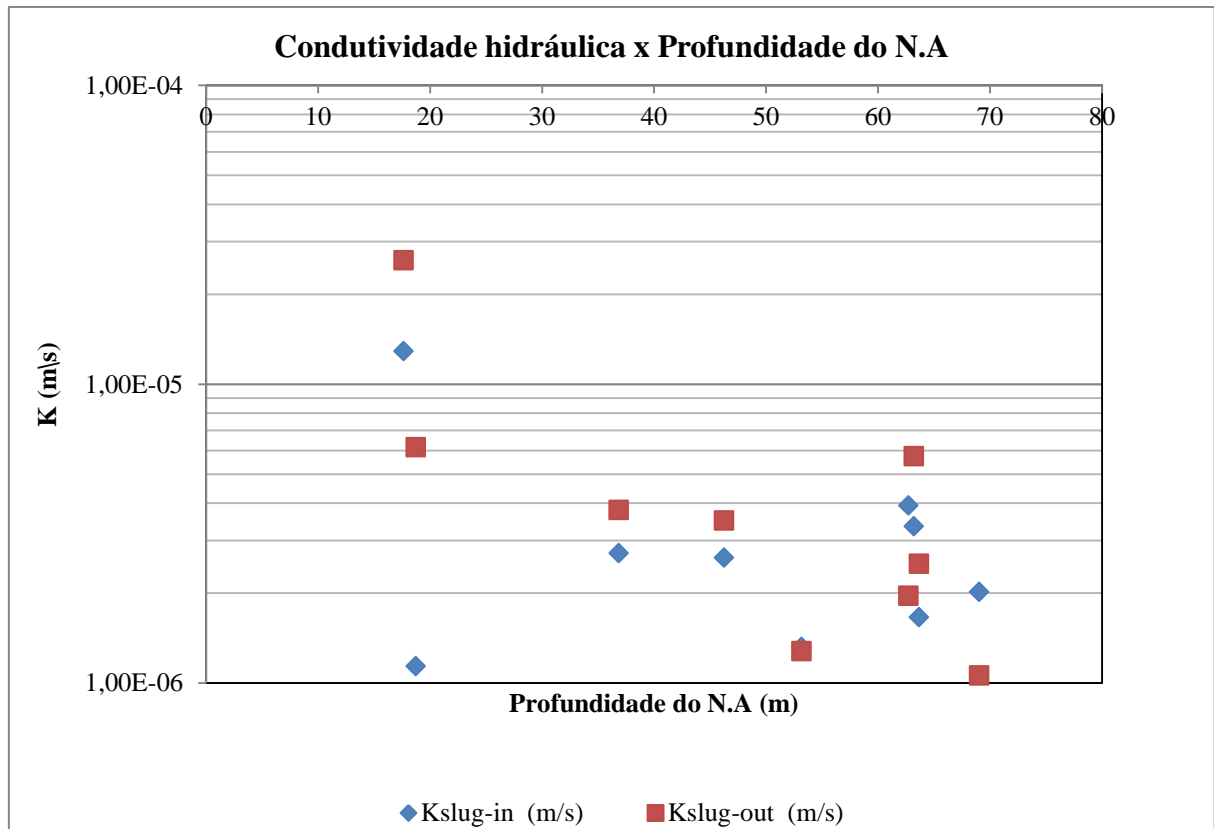


Figura 5.6 – Condutividade hidráulica x profundidade do nível de água

### 5.2.2 – Permeâmetro de Guelph

Os testes com o permeâmetro de Guelph foram realizados em dois locais distintos: a primeira campanha foi conduzida pela empresa MWH, durante os estudos de investigação hidrogeológica da barragem B-8 em 2011; a segunda campanha foi realizada durante este estudo, no ano de 2016, pelos técnicos da CBMM. A localização dos testes realizados nas duas campanhas é mostrada na figura 5.7.

### 5.2.2.1 – Campanha 1: MWH (2011)

Foram realizados 36 testes com o permeâmetro de Guelph, para a determinação da condutividade hidráulica de campo ( $K_{fs}$ ). Os testes foram conduzidos em furos de trado manual, variando de 0,3 a 1,1 metros de profundidade. Os resultados são apresentados na Tabela 5.2. A camada superior do solo é marrom escuro avermelhada, siltosa com presença de raízes. A sua espessura varia de 0,25m a 0,35m. Um solo com areia fina, marrom avermelhada, com clastos de quartzito angular a subangular e filito alterado foi observado de 0,35 m a 1,10 m de profundidade.

Tabela 5.2 – Testes com permeâmetro de Guelph – MWH (2011).

Ensaio	Profundidade (m)	E	N	Litologia	Kfs (m/s)
GP01	0.4	298665	7822784	Anel de quartzitos	3.40E-05
GP02	0.4	298913	7822792	Xistos Alterados	4.10E-05
GP03	0.7	299197	7822850	Xistos Alterados	5.40E-05
GP04	0.6	299272	7822604	Xistos Alterados	5.00E-05
GP05	0.6	299494	7822619	Xistos Alterados	1.20E-05
GP06	0.6	299340	7822430	Xistos Alterados	4.40E-05
GP07	0.3	299155	7822147	Xistos Alterados	1.40E-05
GP08	0.3	299227	7821976	Xistos Alterados	2.70E-05
GP09	0.3	299316	7822250	Xistos Alterados	2.00E-05
GP10	0.3	299570	7822263	Xistos Alterados	1.60E-05
GP11	0.3	299816	7822329	Xistos Alterados	5.40E-05
GP12	1	299746	7822619	Xistos Alterados	3.90E-05
GP13	1	299642	7822856	Xistos Alterados	2.30E-05
GP14	1.1	299448	7823896	Anel de quartzitos	2.00E-05
GP15	1.1	299264	7823431	Anel de quartzitos	1.20E-05
GP16	1	299067	7823586	Anel de quartzitos	5.70E-06
GP17	1	299266	7823596	Anel de quartzitos	1.20E-05
GP18	1.1	299819	7822909	Xistos Alterados	5.70E-05
GP19	1	299719	7823170	Xistos Alterados	8.10E-06
GP20	1	299570	7822369	Xistos Alterados	4.90E-06
GP21	1.1	299729	7823645	Xistos Alterados	2.90E-05
GP22	1	299620	7823901	Xistos Alterados	3.40E-05
GP23	1	299561	7824072	Anel de quartzitos	2.40E-05
GP24	1	299781	7823841	Xistos Alterados	1.80E-05
GP25	1	300000	7823528	Xistos Alterados	7.30E-06
GP26	1.1	300259	7823516	Xistos Alterados	2.10E-05
GP27	1.1	300268	7823282	Xistos Alterados	9.80E-06
GP28	1	300058	7823263	Xistos Alterados	1.00E-05
GP29	1	300222	7823122	Xistos Alterados	2.30E-05
GP30	1.1	300240	7822851	Xistos Alterados	5.00E-05
GP31	1.1	300256	7822678	Xistos Alterados	9.40E-05
GP32	1	300052	7823049	Xistos Alterados	5.50E-05
GP33	1	298555	7822838	Anel de quartzitos	1.70E-05
GP34	1	299103	7822927	Xistos Alterados	1.90E-05
GP35	1.1	299511	7822473	Xistos Alterados	1.80E-05
GP36	1.1	299785	7822537	Xistos Alterados	3.70E-05

Fonte: Relatório MWH (2011)

A condutividade hidráulica calculada encontra-se entre  $9,8 \times 10^{-6}$  e  $1,0 \times 10^{-5}$  m/s com média geométrica de  $2,2 \times 10^{-5}$  m/s. Não há uma correlação aparente entre a permeabilidade dos solos ensaiados com a configuração geomorfológica, ou seja, os solos nos fundos de vale não mostram permeabilidade distinta daqueles dos topos de morro.

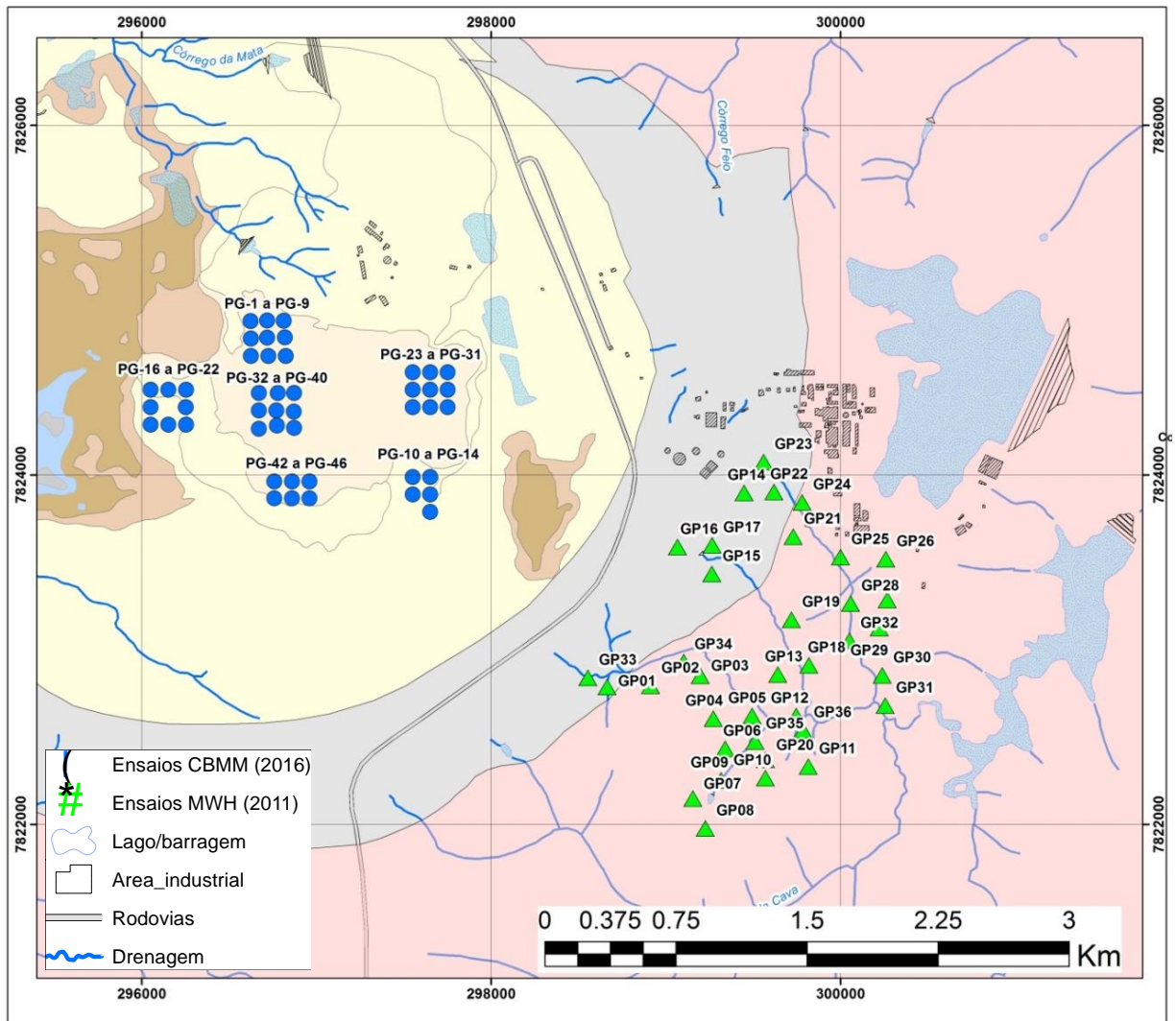


Figura 5.7 – Localização dos testes com permeômetro de Guelph

#### 5.2.2.1 – Campanha 2: CBMM (2016).

A localização dos testes com permeômetro do Guelph realizados na área da mina também pode ser vista no mapa da figura 5.7. Foram realizados 46 testes abrangendo as principais litologias que afloram nas imediações da mina: Solo vermelho, Solo amarelo e Alterito laranja. Os ensaios foram realizados em uma malha quadrada de 100 metros de lado, em furos com 0,5 metros de profundidade. A tabela 5.3 mostra os resultados destes testes.

Tabela 5.3 – Testes com permeômetro de Guelph. CBMM (2016)

Ensaio	Coord. X	Coord. Y	Cota	Unidades	Kfs (m/s)
PG-01	296650	7824886	1085	AL	1.56E-05
PG-02	296717	7824868	1085	AL	3.76E-06
PG-03	296623	7824778	1080	AL	1.88E-06
PG-04	296623	7824778	1080	AL	6.26E-06
PG-05	296723	7824778	1080	AL	4.07E-06
PG-06	296717	7824783	1085	AL	2.50E-06
PG-07	296623	7824678	1073	AL	3.76E-06
PG-08	296723	7824678	1085	AL	7.82E-06
PG-09	296823	7824678	1079	AL	1.79E-07
PG-10	297550	7823986	1150	AA	6.24E-07
PG-11	297650	7823986	1150	AA	1.78E-06
PG-12	297550	7823886	1150	AA	4.46E-07
PG-13	297650	7823886	1150	AA	1.43E-07
PG-14	297650	7823786	1160	AA	2.23E-07
PG-15	296050	7824486	1111	AV	2.05E-06
PG-16	296150	7824486	1100	AV	7.14E-07
PG-17	296252	7824486	1095	AV	1.61E-06
PG-18	296050	7824386	1118	AV	2.50E-06
PG-19	296250	7824386	1104	AV	2.50E-06
PG-20	296050	7824286	1125	AV	1.34E-06
PG-21	296150	7824286	1116	AV	2.68E-07
PG-22	296253	7824286	1113	AV	1.96E-06
PG-23	297551	7824586	1090	AL	2.67E-07
PG-24	297651	7824586	1090	AL	2.41E-06
PG-25	297751	7824586	1090	AL	1.61E-06
PG-26	297551	7824486	1090	AL	1.34E-06
PG-27	297651	7824486	1090	AL	1.34E-06
PG-28	297751	7824486	1090	AL	1.61E-06
PG-29	297551	7824386	1090	AL	2.68E-07
PG-30	297651	7824386	1090	AL	2.85E-06
PG-31	297751	7824386	1090	AL	2.94E-06
PG-32	296870	7824267	1086	AL	3.75E-06
PG-33	296870	7824360	1080	AL	1.16E-06
PG-34	296871	7824467	1080	AL	1.96E-06
PG-35	296778	7824467	1080	AL	1.16E-06
PG-36	296770	7824367	1080	AL	1.78E-06
PG-37	296772	7824280	1086	AL	1.96E-06
PG-38	296670	7824262	1096	AL	1.78E-06
PG-39	296670	7824367	1086	AL	1.34E-06
PG-40	296670	7824467	1085	AL	1.34E-06
PG-41	296758	7823961	1130	AL	3.75E-06
PG-42	296858	7823961	1130	AL	1.61E-06
PG-43	296958	7823961	1130	AL	1.52E-06
PG-44	296758	7823863	1155	AL	3.75E-06
PG-45	296858	7823863	1155	AL	1.61E-06
PG-46	296958	7823863	1155	AL	3.30E-06

AL: alterito laranja; AV: solo vermelho; AA: solo amarelo

A condutividade hidráulica calculada para o alterito laranja varia de  $1,79 \times 10^{-7}$  m/s a  $1,56 \times 10^{-5}$  m/s. A média geométrica deste conjunto de amostras foi igual a  $1,97 \times 10^{-6}$  m/s. As condutividades dos materiais argilosos variaram entre  $2,50 \times 10^{-6}$  e  $1,43 \times 10^{-7}$  m/s e o valor da média geométrica é igual a  $8,70 \times 10^{-7}$  m/s.

### 5.2.3 – Testes hidráulicos em perfuração

O programa de perfurações e testes hidráulicos na área da barragem B-8 foi realizado em 2013. Este trabalho foi realizado pela empresa *Golder Associates*, contratada da CBMM. Foram realizadas 16 perfurações e um total de 168 testes, entre carga constante, carga descendente e testes com obturadores, nos xistos do Grupo Ibiá

O gráfico da figura 5.8 mostra os resultados de todos os testes realizados, de acordo com a profundidade, para cada tipo de material atravessado pelas perfurações.

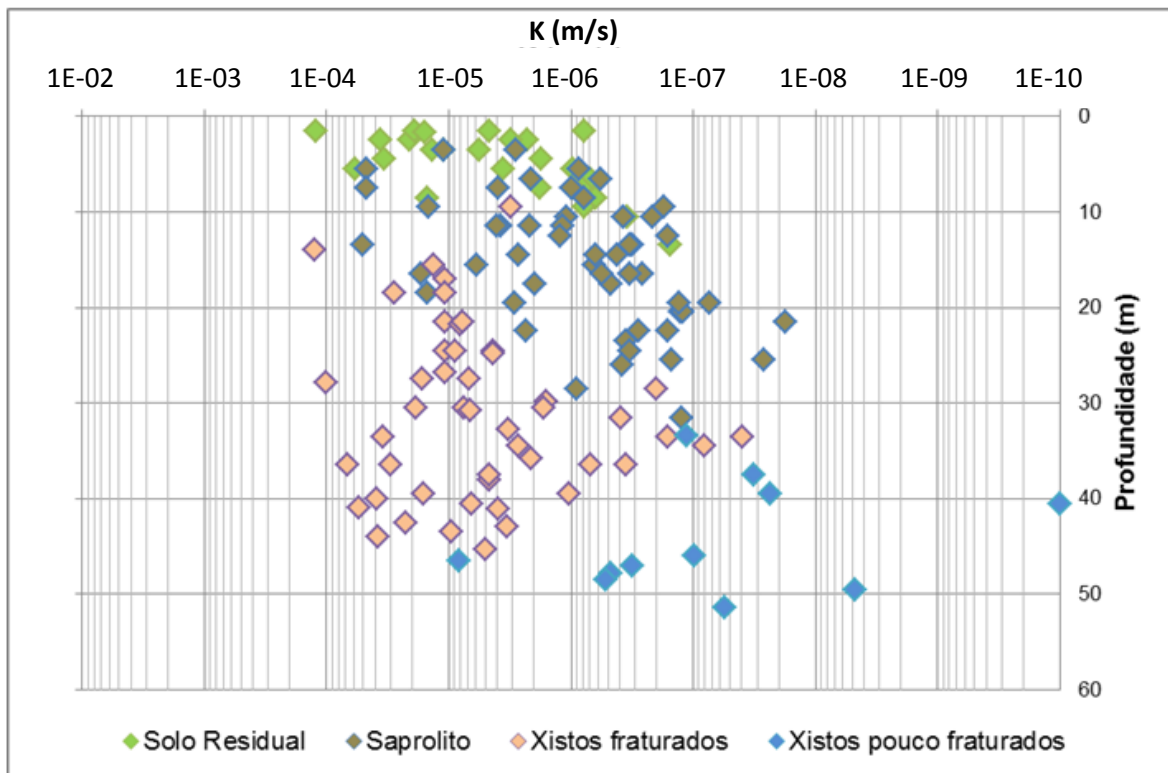


Figura 5.8 – Condutividade hidráulica x profundidade por litologia. Golder Associates (2013)

A condutividade hidráulica, de maneira geral, tende a diminuir sensivelmente, à medida que a profundidade aumenta. O solo residual apresentou uma permeabilidade variando de  $1,0 \times 10^{-4}$  m/s até  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s, na maioria dos ensaios. Os ensaios no saprolito, porção de solo que marca a transição para a rocha sã, mostraram grande variedade de resultados de permeabilidade, porém a principal concentração está na faixa entre  $5,0 \times 10^{-5}$



m/s e  $1,0 \times 10^{-7}$  m/s. Considerando-se a condutividade hidráulica em rochas, observou-se também uma ampla variedade de valores para os xistos fraturados e alterados. De uma maneira geral os xistos fraturados e alterados apresentaram condutividade hidráulica variando de  $1,0 \times 10^{-4}$  até  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s. Os xistos pouco fraturados, horizonte de rochas em profundidade onde a ocorrência de fraturas e falhas não é comum ou se dá de maneira localizada, apresentaram valores de condutividade hidráulica variando entre  $1,0 \times 10^{-6}$  m/s a  $1,0 \times 10^{-8}$  m/s. O valor de condutividade nula  $<10^{-10}$  m/s apresentado na figura 5.21 corresponde a um ensaio, em um intervalo de rocha pouco fraturada, em que não houve nenhuma absorção de água durante os 50 minutos do ensaio.

Já os quartzitos fenitizados foram ensaiados em 21 testes no trabalho realizado pela empresa MWH, no ano de 2011. Neste litotipo foram medidos valores que variaram de  $2,0 \times 10^{-6}$  m/s (da superfície até 60 metros de profundidade) a  $2,0 \times 10^{-7}$  m/s (de 60 a 80 metros de profundidade).

A Tabela 5.4 apresenta uma síntese da caracterização hidrogeológica dos solos e rochas da região da fundação da barragem B-8.

Tabela 5.4 – Valores de permeabilidade nas litologias da região da barragem B-8.

Unidade geológica geotécnica	Constituintes principais	Valores de K (m/s)
Solo residual	Silte, com porções foliadas	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$ m/s
Saprolito	Silte, com foliação reliquiar	$5 \times 10^{-5}$ a $1 \times 10^{-7}$ m/s
Xistos fraturados e alterados	Rocha fraturada	$1 \times 10^{-4}$ a $1 \times 10^{-6}$ m/s
Xistos pouco fraturados	Rocha	$1 \times 10^{-6}$ a $1 \times 10^{-8}$ m/s
Quartzitos fenitizados	Níveis arenosos interperizados e rocha sã	$2 \times 10^{-6}$ a $2 \times 10^{-7}$ m/s

Fonte: Golder Associates (2013)

### 5.3 – Inventário de nascentes

O objetivo principal do inventário é gerar dados que subsidiem a definição da rede de monitoramento hídrico e a sua implantação na região de estudo. Esta fase serviu também para definir a localização da tomada de amostras para a caracterização hidroquímica.

Foram cadastrados 55 pontos, distribuídos da seguinte forma pelas sub-bacias: nove pontos no córrego Capivarinha, quatro no córrego da Cava, dez no córrego da Bocaina, um no

córrego da Mata, oito no córrego Feio, dois no córrego Mourão Rachado, cinco no córrego Santa Rita, quatro no córrego do Sal e três no córrego dos Borges. Foram ainda identificados nove pontos não relacionados diretamente a sub-bacias: Fonte D. Beja, Fonte Andrade Júnior e um ponto de surgência dentro da mina da CBMM. Os seis pontos restantes estão localizados nas cavas das minas do Barreiro e do F4, atualmente operadas pela Vale Fertilizantes.

De acordo com Linsley & Franzini (1978), as nascentes podem ser classificadas quanto à sua formação, em nascente sem acúmulo ou pontual (quando a descarga do aquífero concentra-se em uma pequena área, comum quando o afloramento ocorre em um terreno declivoso) e com acúmulo ou difusa (comum quando a camada impermeável fica paralela à parte mais baixa do terreno e, estando próxima à superfície, acaba por formar um lago, açude, brejo, lagoa ou banhado).

A tabela 5.5 mostra a relação das nascentes inventariadas.

Das 55 nascentes mapeadas, foram eleitos 25 pontos para realização de amostragem e análises hidroquímicas, divididos da seguinte forma: 4 amostras no interior do Complexo (águas interiores); 8 amostras nas bordas da intrusão (águas do anel de quartzitos); 13 amostras na porção exterior ao Complexo (águas exteriores ao Complexo).

De modo geral, as surgências cadastradas apresentam vazões baixas. As vazões estimadas mais altas foram observadas na região do Complexo Hidromineral do Barreiro, representados pela Fonte D. Beja e o ponto NA-40, no córrego dos Borges. A maior parte das nascentes mapeadas apresenta modo de ocorrência pontual, associadas a faturamento em rocha. Foram observados alguns pontos de nascentes difusas, normalmente em regiões de charcos em porções mais baixas da topografia.

A localização das nascentes é mostrada na figura 5.9.

#### **5.4 – Hidroquímica**

Os resultados completos das análises hidroquímicas encontram-se no Apêndice C.

De acordo com os dados colhidos em campo, pode-se observar que, de forma geral, as águas apresentam valores bastante variáveis de condutividade elétrica (C.E). Isto pode indicar diferentes composições mineralógico-litológicas do meio por onde flui a água subterrânea, que realiza aporte nas nascentes mapeadas, além do tempo de residência dessa água nas rochas hospedeiras.

Tabela 5.5 – Relação das nascentes inventariadas em janeiro de 2016

Ponto	Sub-bacia	Coordenadas UTM - Datum Córrego Alegre		Cota (m)
		Coord. E	Coord. N	
NA-1	Córrego Capivarinha	294496	7823233	1105
NA-2	Córrego Capivarinha	294533	7823207	1105
NA-3	Córrego Capivarinha	294275	7823154	1085
NA-4	Córrego Capivarinha	294683	7822467	1127
NA-5	Córrego da Cava	297372	7822223	1177
NA-6	Córrego da Cava	297362	7822188	1170
NA-7	Córrego da Cava	297977	7822480	1146
NA-8	Córrego da Cava	298645	7822202	1130
NA-9	Córrego da Bocaina	299245	7822151	1091
NA-10	Córrego da Bocaina	299349	7822708	1095
NA-11	Córrego da Bocaina	299464	7823405	1108
NA-12	Córrego da Bocaina	299570	7824019	1123
NA-13	Córrego da Bocaina	300171	7823463	1101
NA-14	Córrego da Bocaina	300747	7822939	1060
NA-15	Córrego da Bocaina	300887	7823461	1063
NA-16	Córrego da Mata	296432	7826292	1031
NA-17	Córrego da Bocaina	301124	7823874	1070
NA-18	Córrego da Bocaina	301150	7823868	1068
NA-19	Mina F4	298499	7824158	1081
NA-20	Mina F4	298131	7823966	1052
NA-21	Mina do Barreiro	294952	7823836	1127
NA-22	Mina do Barreiro	295238	7824276	980
NA-23	Mina do Barreiro	296052	7823809	1085
NA-24	Mina do Barreiro	295134	7824030	1037
NA-25	Córrego Feio	299319	7825471	1098
NA-26	Córrego Feio	299314	7825523	1094
NA-27	Córrego Feio	299274	7825716	1087
NA-28	Córrego Feio	299934	7825580	1105
NA-29	Córrego Feio	299676	7825588	1103
NA-30	Córrego Mourão Rachado	300437	7825775	1075
NA-31	Córrego Mourão Rachado	300374	7825538	1090
NA-32	Córrego Santa Rita	298576	7826946	1072
NA-33	Córrego Santa Rita	298561	7826930	1072
NA-34	Córrego Santa Rita	297797	7826997	1064
NA-35	Córrego Santa Rita	297887	7827289	1058
NA-36	Córrego Santa Rita	297410	7827745	1067
NA-37	Córrego do Sal	296350	7827823	1028
NA-38	Córrego do Sal	296148	7827688	1004
NA-39	Córrego do Sal	296069	7827074	1006
NA-40	Córrego Borges	295364	7826402	970
NA-41	Fonte Dona Beja	295737	7826057	982
NA-42	Fonte Andrade Júnior	295499	7826525	964
NA-43	Córrego Borges	294837	7826954	998
NA-44	Córrego Borges	294591	7827023	1024
NA-45	Córrego do Sal	297021	7827848	1054
NA-46	Mina CBMM	297013	7824229	1080
NA-47	Córrego Feio	299090	7826897	1060
NA-48	Córrego da Bocaina	298643	7822836	1116
NA-49	Córrego Feio	298795	7826302	1081
NA-50	Córrego Feio	298803	7826313	1080
NA-51	Córrego Capivarinha	295569	7822163	1101
NA-52	Córrego Capivarinha	295422	7822146	1093
NA-53	Córrego Capivarinha	296769	7822021	1141
NA-54	Córrego Capivarinha	296390	7822048	1130
NA-55	Córrego Capivarinha	296425	7822017	1130

Fonte: DEHO (2015)

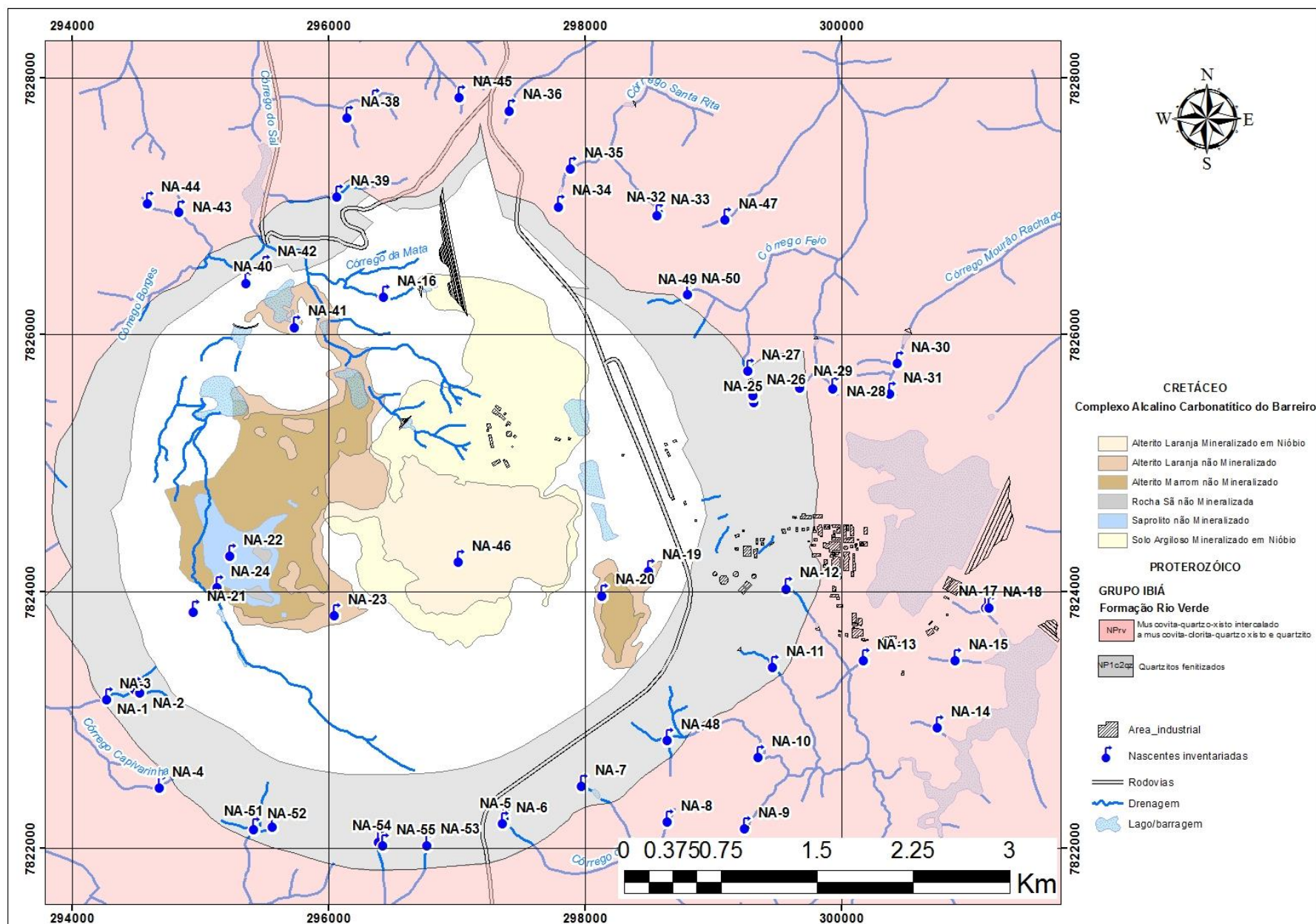


Figura 5.9- Mapa de localização das nascentes inventariadas. (GOMES, 2015).

A mineralogia encontrada em intrusões carbonatíticas é bastante reativa, o que confere à água uma salinidade relativamente elevada, ainda que com um tempo de residência relativamente baixo (BERTOLO *et al.*, 2007). Além disso, minerais encontrados em rochas ultramáficas são, tipicamente, os mais reativos dentre os silicatos e também podem contribuir para elevar a salinidade em alguns pontos.

Os valores de condutividade elétrica nas nascentes do córrego Capivarinha, apresentam média da ordem de  $120\mu\text{S}/\text{cm}$ , mas variando de 46 a  $271\mu\text{S}/\text{cm}$ , indicando águas de escoamento mais profundo.

Valores mais baixos, em média  $80\mu\text{S}/\text{cm}$ , são encontrados nas nascentes de montante do córrego da Bocaina. Entretanto, nos pontos NA-61 e NA-62 os valores são mais altos, 170 e  $138\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente, o que pode ser consequência de serem pontos mais de jusante em áreas mais baixas.

As nascentes do córrego da Cava, situado na porção SE da área de estudo, apresentam valores da ordem de  $50\mu\text{S}/\text{cm}$ , à exceção do ponto NA-38, situado em áreas alagadiças, na cota mais baixa deste córrego, que apresentou condutividade elétrica de  $106\mu\text{S}/\text{cm}$ .

As nascentes do córrego Feio apresentam condutividade elétrica da ordem de  $90\mu\text{S}/\text{cm}$ .

O córrego Mourão Rachado conta apenas com 2 pontos de nascente cadastrados e apresenta valores parecidos com o do córrego da Cava, ou seja, aproximadamente  $50\mu\text{S}/\text{cm}$ .

As surgências observadas no córrego Santa Rita apresentam valores de C.E da ordem de  $100\mu\text{S}/\text{cm}$ , com os maiores valores nos pontos NA-14 e NA-15, ou seja, 110 e  $108\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente.

Na Fonte Andrade Júnior, conhecida como uma surgência sulfurosa, os parâmetros são extremamente anômalos, com o pH básico (9,96). A C.E não pôde ser medida, uma vez que, extrapolou a escala de leitura do equipamento utilizado, que vai até  $4000\mu\text{S}/\text{cm}$ . Segundo Raposo (2011), a C.E é maior do que  $5800\mu\text{S}/\text{cm}$ , nesse ponto. Quanto à temperatura essa fonte pode ser classificada como hipotermal, pois foi verificada uma temperatura de  $32,2^{\circ}\text{C}$ .

A fonte Dona Beja, apresenta valores mais condizentes com as leituras regionais, com C.E de  $127\mu\text{S}/\text{cm}$ , pH de 6,86 e Temperatura de  $23,3^{\circ}\text{C}$ .

A surgência com menor C.E foi observada na região central da mina de nióbio, com  $5\mu\text{S}/\text{cm}$ , o que evidencia escoamento superficial da água. Neste local, a superfície de lavra do minério interceptou o nível de água subterrânea, gerando vários pontos de surgência. Já nas

cavas da Vale Fertilizantes (Barreiro e F4) os valores são mais elevados, ficando em média a  $100\mu\text{S}/\text{cm}$  (RAPOSO, 2011).

Para Fetter (2001), enquanto a água flui por um aquífero, ela assume uma composição química diagnóstica, como resultado das interações com o meio pelo qual ela flui. O termo fácies hidroquímicas é frequentemente utilizado para descrever os corpos de água subterrânea, que diferem em sua composição química. As amostras foram tomadas de modo a contemplar as litologias da área de estudo e figuram em três fácies hidroquímicas distintas: Águas interiores ao CACB (com duas subfácies: nascentes e águas subterrâneas), águas do anel de quartzitos fenitizados (nascentes) e águas exteriores ao CACB (nascentes). A partir dos resultados do trabalho de inventário de nascentes, foram coletadas 36 amostras, mas apenas 24 foram utilizadas, uma vez que, as restantes não satisfizeram as condições para o fechamento do balanço iônico, cujos resultados encontram-se no Apêndice D.

O mapa da figura 5.10 mostra a localização das amostras com a representação dos diagramas de Stiff. A diferenciação em quatro grupos hidroquímicos fica evidente: O Grupo 1 é representado pelas amostras de água de nascentes posicionadas no interior do CACB e mesmo fora dele, na porção norte; o Grupo 2 diz respeito às amostras realizadas nos Indicadores de Nível de Água, consideradas portanto como águas subterrâneas; o Grupo 3 representa as águas de nascentes localizadas nos domínios do anel de quartzitos. O Grupo 4 é formado pelas nascentes exteriores ao CACB, localizadas nos xistos. É possível perceber que enquanto a água flui pelo CACB e para fora dele, há uma tendência de aumento de íons dissolvidos na água, a partir do anel de quartzitos fenitizados.

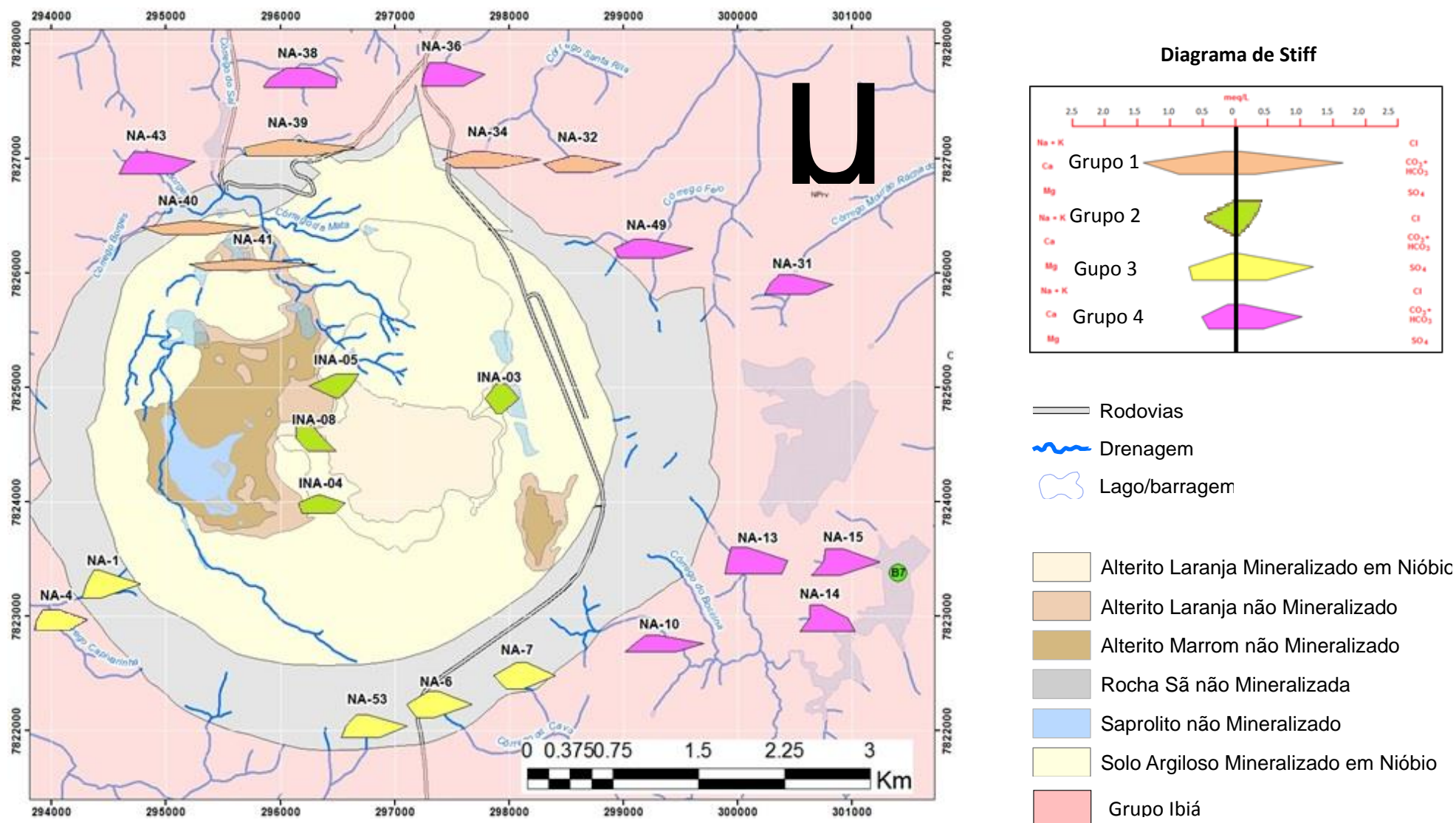


Figura 5.10 – Mapa de localização das amostras – Diagramas de Stiff



### 5.4.1 – Classificação química das águas

Analisando-se o diagrama de Piper da figura 5.11, as águas amostradas, em sua maioria, são classificadas como bicarbonatadas cálcio-magnesianas. Em duas amostras de água do interior do CACB, que fluem pelos alteritos, foram observados resultados nos quais a água apresenta-se um pouco mais cálcica e sulfetada (INA-05 e INA-08). As amostras que representam as surgências da parte externa do CACB, ou seja, os xistos, possuem basicamente uma composição bicarbonatada mista. Já as águas das surgências que ocorrem no anel de quartzitos fenitizados dividem-se entre bicarbonatadas cálcicas e mistas, com maiores concentrações de  $\text{HCO}_3^-$  do que as demais.

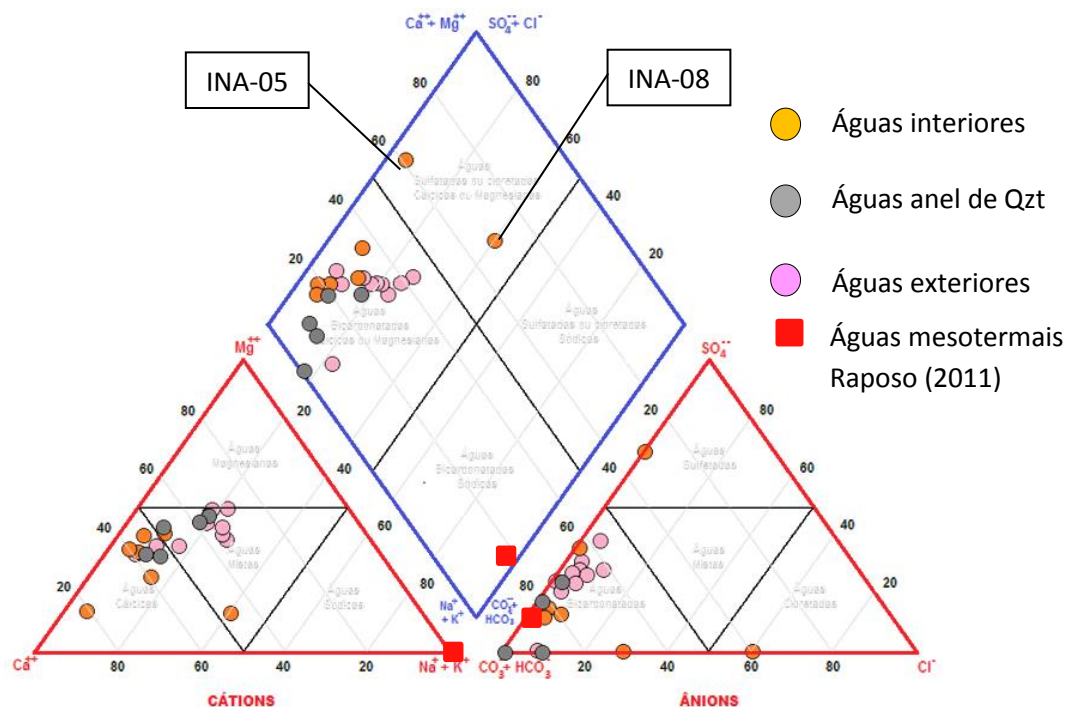


Figura 5.11 - Diagrama de Piper.

Esta classificação é típica em águas continentais e indica certa interação da água com minerais carbonáticos e com matéria orgânica nos solos (APPELO & POSTMA, 2005). Conforme observado por Issa Filho *et al.* (1984), os minerais carbonatados, ao menos na área da mina da CBMM, estão ausentes ou em concentrações abaixo do detectável. Entretanto, estes minerais podem estar presentes de forma residual e disseminada, em porções menos intemperizadas dos alteritos, o que, considerando a composição dolomítica do carbonatito, resultaria em águas do tipo cálcica-magnesiânica-bicarbonatada.



No entanto, algumas amostras se diferenciam das demais em função da composição química de seus íons principais:

- As águas classificadas por Raposo (2011) como “mesotermiais” referem-se à Fonte Andrade Jr. e ao Poço Paulo Cherulli, cuja temperatura está na faixa entre 30°C e 35°C. Estas águas são do tipo sódica-potássica-bicarbonatada e possuem composição química significativamente diferente das demais, com alta salinidade e concentrações de cálcio e magnésio extremamente baixas. É importante ressaltar que nenhuma das amostras tomadas neste estudo, ou por Raposo (2011), possui resultados próximos dos obtidos para as águas mesotermiais. Isto pode indicar que não há interconexão no fluxo ou interação destas águas e as demais, coletadas nos pontos destes dois trabalhos.
- A amostra coletada no INA-05 apresenta composição química um pouco mais cálcica e sulfetada em relação às demais. Tais resultados são função das pequenas concentrações de cátions e ânions nesta amostra, o que faz com que qualquer pequena variação acarrete um efeito aparente no diagrama de Piper. No entanto, estes dados indicam que a água amostrada no INA-05 fluiu por porções mais intemperizadas e consequentemente menos reativas do manto de intemperismo, resultando na sua baixa salinidade.

#### 5.4.2 – Índices de saturação

Os índices de saturação foram obtidos para os minerais selecionados e são apresentados na tabela 5.5. Nesta tabela estão contidos tanto os resultados das amostras tomadas para este trabalho (identificação SWS-\*\*), quanto as amostras tomadas por Raposo (2011) (identificação P-\*\*). Os dados foram analisados em conjunto. Na figura 5.12 são apresentados os diagramas de dispersão, onde são comparados alguns destes índices com concentrações de certas espécies dissolvidas. Os pontos nos gráficos foram identificados como SLB (2016) e se referem ao presente trabalho, pois a empresa *Schlumberger Water Services* participou das coletas e intermediou as análises. Já as amostras identificadas como Raposo (2011), se referem àquelas coletadas por este autor.

Conforme demonstrado na tabela 5.6, as águas amostradas estão, na sua maioria, insaturadas em relação aos minerais considerados, ou seja, com índices de saturação menores do que -0,5. A exceção fica por conta da barita, que figura como o único mineral mais reativo com a água, presente em concentrações significativas no meio, com concentração média de 20%, segundo Issa Filho *et al.* (1984). Para Bertolo (2007), a baixa relação iônica entre metais

alcalinos e cálcio, ao lado da elevada relação  $[\text{HCO}_3^-/\text{SiO}_2]$ , indicam que a dissolução dos minerais carbonáticos é a principal fonte de cálcio para a água subterrânea no CACB. Além disso, as elevadas concentrações relativas de bário estão provavelmente ligadas à dissolução de barita em veios da rocha encaixante.

Tabela 5.6 – Índices de saturação em relação a minerais selecionados.

Ponto	Amostra	Litotipo	Índice de Saturação						
			Anidrita	Barita	Calcita	Dolomita	Fluorita	Halita	Siderita
Poço Andrade Jr.	P-1	Qzt. Fenit.	-3,96	0,44	-0,59	-1,48	-2,05	-5,77	0,07
PP02	P-10	Alt. Marrom	-3,60	0,09	-2,33	-4,74	-2,85	-10,19	-2,95
PP3	P-11	Alt. Marrom	-4,29	0,03	-2,41	-4,87	-1,47	-10,25	-3,05
Fonte Dona Beja	P-13	Alt. Marrom	-4,34	0,08	-2,25	-4,18	-2,92	-10,15	-2,56
LAGO-A	P-14	Lago	-3,88	0,47	-1,36	-2,52	-3,15	-9,51	-1,47
PAP-7	P-15	Alt. Marrom	-3,95	-0,04	-1,44	-2,79	-2,15	-9,35	-1,53
BEJA-1	P-17	Alt. Marrom	-3,98	0,29	-0,91	-1,74	-2,39	-9,42	-1,17
BEJA-2	P-18	Alt. Marrom	-4,06	-0,28	-1,37	-2,88	-2,28	-10,24	-1,77
Fonte Paulo Cherulli	P-2	Qzt. Fenit.	-4,47	0,26	0,13	0,20	-2,61	-5,82	0,32
Poço P-4	P-3	Qzt. fenit.	-4,04	-0,33	-0,80	-1,61	-2,33	-9,70	-1,62
BU06A	P-4	Rocha sã frat.	-4,03	-0,12	-0,75	-1,44	-2,08	-10,10	-1,12
Alto Paulista	P-5	Qzt. fenit.	-3,93	0,07	-0,05	-0,16	-2,72	-10,43	-1,29
LAGO-F	P-7	Lago	-3,78	0,17	-2,14	-4,15	-2,89	-10,65	-2,24
LAGO-E	P-8	Lago	-3,81	0,21	-2,59	-5,05	-2,75	-10,70	-2,52
Poço P-1	P-9	Alt. Marrom	-4,15	0,03	-1,62	-2,98	-2,98	-9,76	-2,41
INA-06	SWS-01	Alt. Laranja	-4,03	0,50	-2,94	-6,05	-1,88	-11,36	-2,66
INA-05	SWS-02	Alt. Laranja	-3,83	0,96	-3,89	-8,36	-1,59	-11,04	-3,93
NA-41	SWS-03	Alt. Marrom	-3,57	0,51	0,04	0,05	-2,10	-10,57	-3,37
B7	SWS-04	Lago	-4,19	-0,09	-1,01	-1,82	-2,71	-10,60	-4,14
NA-13	SWS-07	Xistos	-4,06	-0,13	-2,77	-5,32	-3,19	-10,30	-2,20
NA-1	SWS-08	Xistos	-4,20	-0,35	-2,86	-5,55	-2,83	-10,21	-2,12

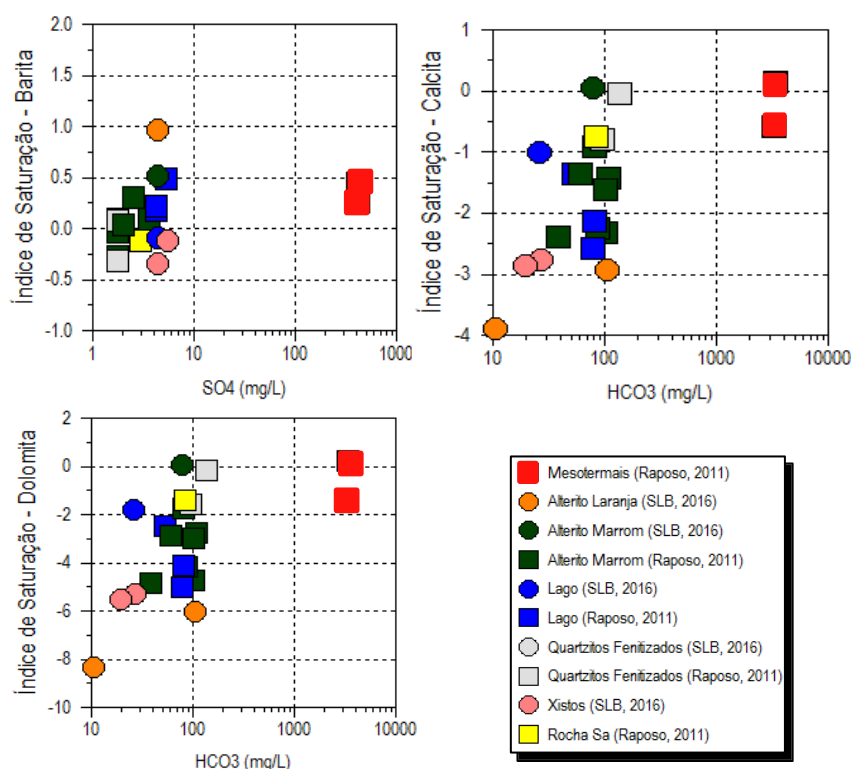


Figura 5.12 – Diagramas dos índices de saturação em relação às espécies dissolvidas

Quanto aos minerais carbonatos (calcita, dolomita e siderita), nota-se que a maior parte das amostras, realizadas no alterito, são insaturadas em relação a estes. Isto pode ser explicado pela baixa concentração destes minerais no meio. Os diagramas das figuras 5.13 e 5.14 permitem entender melhor esta relação entre as águas amostras e os minerais carbonatos.

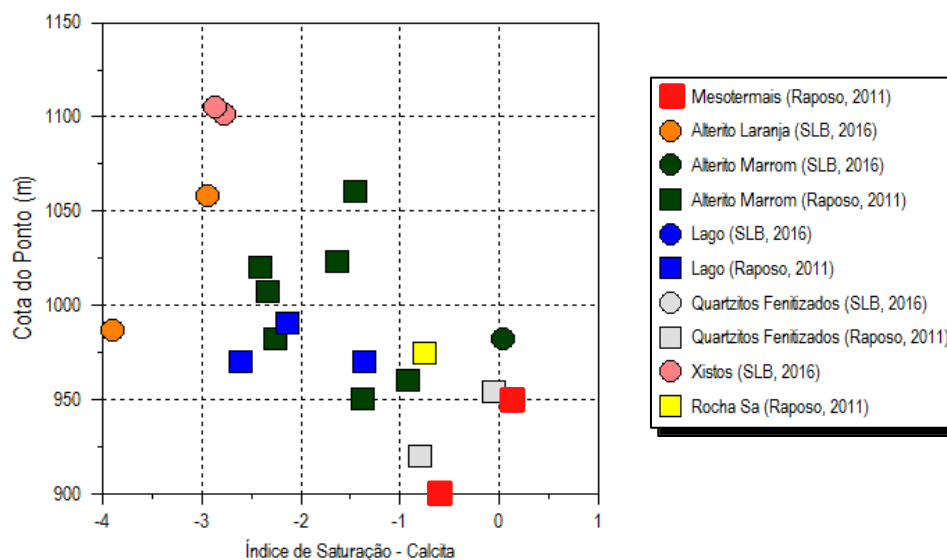


Figura 5.13 – Diagrama comparando o índice de saturação em relação à calcita e a cota do ponto

A figura 5.13 indica certa correlação entre o índice de saturação da calcita (utilizada apenas como um indicador de mineral carbonato) e a cota do ponto, ou seja, quanto menor a cota, maior tende a ser o índice. Ao mesmo tempo, no gráfico da figura 5.9 nota-se que a maior parte das amostras se posiciona na linha de 2 moles de bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ) para um mole de cálcio + magnésio.

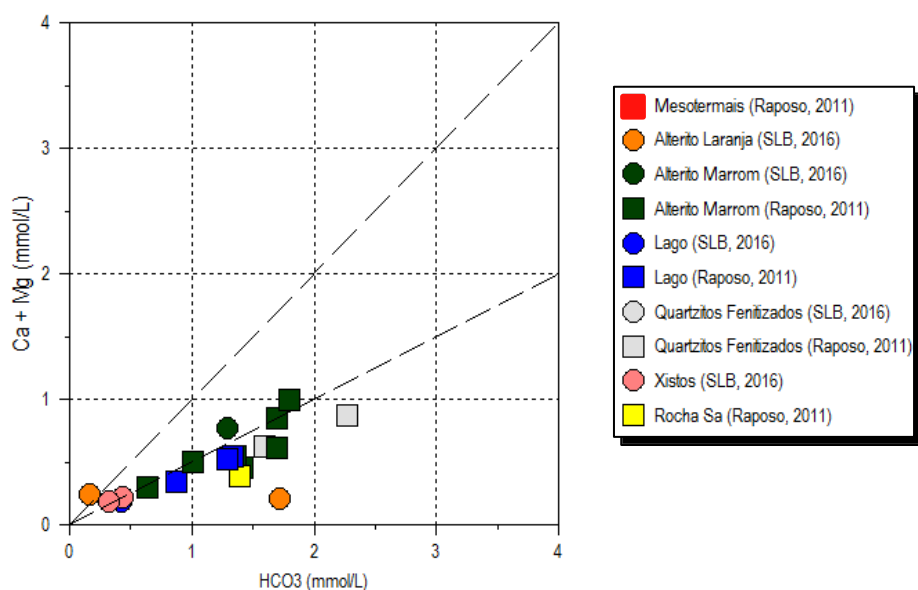
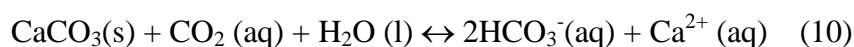


Figura 5.14 – Diagrama comparando as concentrações de cálcio, magnésio e bicarbonato

Os dois diagramas indicam que conforme a água subterrânea flui pelo manto de intemperismo do CACB, estas interagem com minerais carbonatos disseminados no meio, controlando as concentrações de cálcio, magnésio e bicarbonato. A saturação, entretanto, não é alcançada, tendo em vista que os minerais carbonatos estão, de forma geral, em baixas concentrações no meio e que, conforme a água flui por porções menos intemperizadas dos alteritos (cotas mais baixas), há maior tendência para ocorrer reações entre a água e os minerais carbonatos.

A relação 2:1 demonstrada na figura 5.9 indica que a reação de dissolução de minerais se dá na presença de CO<sub>2</sub>, conforme pode ser visto na reação da equação 10.



A equação indica que para cada dois moles de bicarbonato em solução, um seria oriundo de mineral carbonato (calcita) e um oriundo de CO<sub>2</sub>. Esta relação é importante para a interpretação dos resultados dos isótopos de carbono-13 e carbono-14 que serão apresentados mais adiante, neste trabalho.

## 5.5 – Amostragem e análise de Isótopos

Para o estudo de isótopos foram tomadas seis amostras de águas de nascentes e subterrâneas. As amostras foram divididas da seguinte forma: duas amostras em poços de monitoramento (INA); uma amostra em lago (Barragem B7) para avaliação das águas evaporadas; três amostras em surgências posicionadas na borda e exterior da intrusão; uma amostra da água de chuva. A tabela 5.7 traz as principais informações dos pontos amostrados. Adicionalmente, foram avaliados neste estudo dados de um trabalho anterior, realizado por Raposo (2011). Trata-se de resultados físico-químicos e de isótopos coletados em 15 pontos, como poços, nascentes e lagos. Os isótopos analisados foram: Oxigênio-18, deutério, trítio e carbono-13. Em uma amostra coletada na fonte Andrade Jr. (P-1) foi analisado o Carbono-14. A localização dos pontos amostrados por Raposo (2011) é apresentada na tabela 5.8. A figura 5.15 mostra o mapa com a localização de todas as amostras realizadas.

Tabela 5.7 – Principais informações dos pontos amostrados para isótopos

Ponto	Amostra	Coordenadas (Córrego Alegre Zona 23S)		Cota	Tipo	Litotipo
		Coord. E	Coord. N			
INA-06	SWS-01	297789	7824415	1058	Poço	Alterito Laranja
INA-05	SWS-02	296485	7825032	987	Poço	Alterito Laranja
NA-41*	SWS-03	295737	7826057	982	Nascente	Alterito Marrom
B7	SWS-04	301356	7823410	1100	Lago/Barragem	-
NA-13	SWS-07	300171	7823463	1101	Nascente	Xistos
NA-1	SWS-08	294496	7823233	1105	Nascente	Xistos
Chuva	SWS-10	-	-	-	Chuva	-

Tabela 5.8 – Principais informações dos pontos amostrados por Raposo (2011)

Ponto	Amostra	Coordenadas (Córrego Alegre Zona 23S)**		Cota (m)***	Tipo	Litotipo
		Coord. E	Coord. N			
Poço Andrade Jr.	P-1	295499	7826510	900	Poço	Quartzitos fenitizados
Fonte Paulo Cherulli	P-2	295468	7826436	950	Nascente	Quartzitos fenitizados
Poço P-4	P-3	294968	7826447	920	Poço	Quartzitos fenitizados
BU06A	P-4	294629	7825818	974	Poço	Rocha sã fraturada
Alto Paulista	P-5	294682	7825008	954	Poço	Quartzitos fenitizados
Lago F	P-7	295256	7825734	990	Lago	-
Lago E	P-8	295339	7826083	970	Lago	-
Poço P-1	P-9	298076	7824330	1023	Poço	Alterito Marrom
PP-02	P-10	298156	7824334	1007	Poço	Alterito Marrom
PP-3	P-11	297975	7823162	1020	Poço	Alterito Marrom
Dona Beja***	P-13	295600	7826042	960	Nascente	Alterito Marrom
Lago A	P-14	295911	7826059	970	Lago	-
PAP-07	P-15	298514	7824113	1060	Poço	Alterito Marrom
BEJA-1	P-17	295722	7826008	960	Poço	Alterito Marrom
BEJA-2	P-18	295554	7825824	950	Poço	Alterito Marrom

\* Esta amostra foi tomada tanto no trabalho de Raposo (2011) quanto neste estudo, como controle.

\*\*A dissertação de Raposo (2011) não possui tabela com as coordenadas dos pontos. Apenas há o mapa indicando a localização destes pontos. As coordenadas mostradas nesta tabela foram inferidas com base neste mapa e podem conter erros.

\*\*\*Em amostras de poço a cota refere-se à cota topográfica média da sessão filtrante.

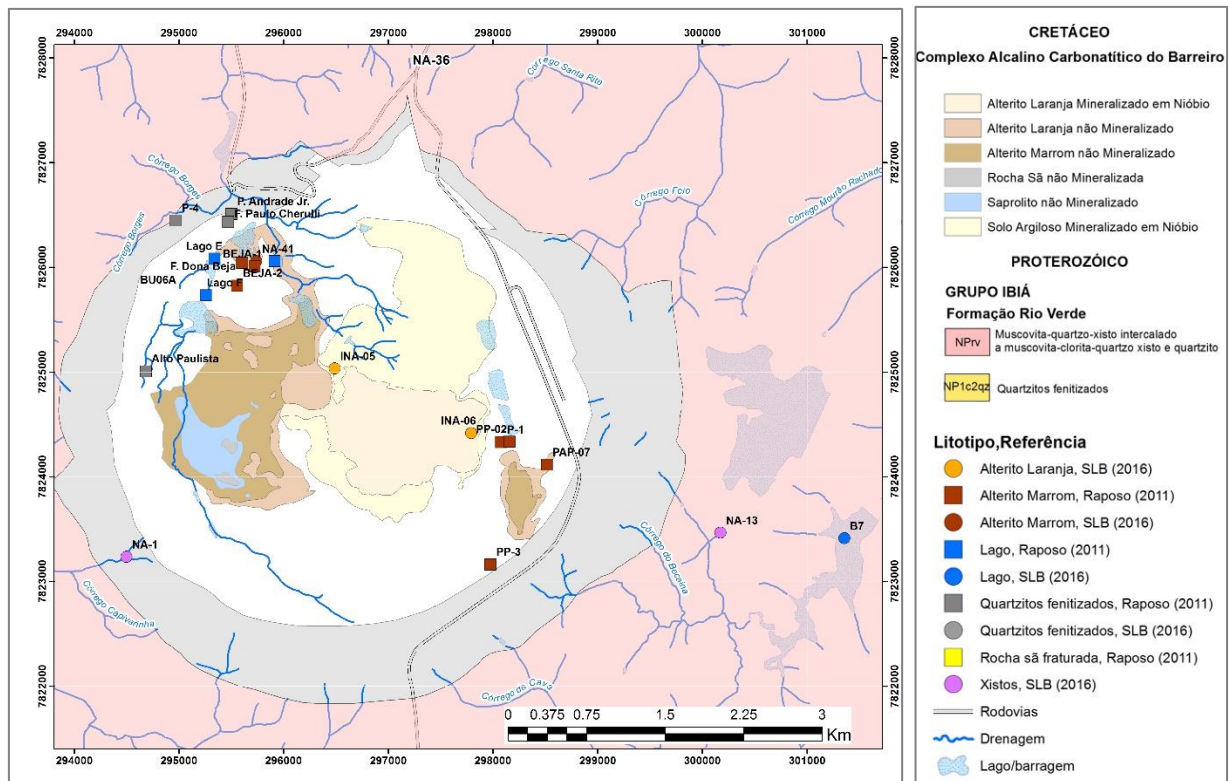


Figura 5.15 – Mapa de localização das amostras do estudo de isotópico

No trabalho de Raposo (2011), optou-se por coletar amostras principalmente em poços, diferentemente dos pontos selecionados neste trabalho, que incluiu nascentes, principalmente. Assim, analisando-se os dados em conjunto é possível se chegar a um entendimento mais profundo da área de interesse. Ressalte-se novamente que há, em comum, apenas um ponto de amostragem, catalogado como fonte Dona Beja e cadastrada como NA-41 no trabalho de inventário de nascentes (amostra SWS-03).

### 5.5.1 – Oxigênio-18 e Deutério

Os resultados de oxigênio-18 e deutério e os resultados para os demais isótopos são apresentados na tabela do Apêndice E. O gráfico da figura 5.16 mostra os resultados de oxigênio-18, comparados aos de deutério, juntamente com linha meteórica global ( $\delta D = 8,17 \times \delta^{18}O + 11,27\%$ ; Clark & Fritz, 1997).

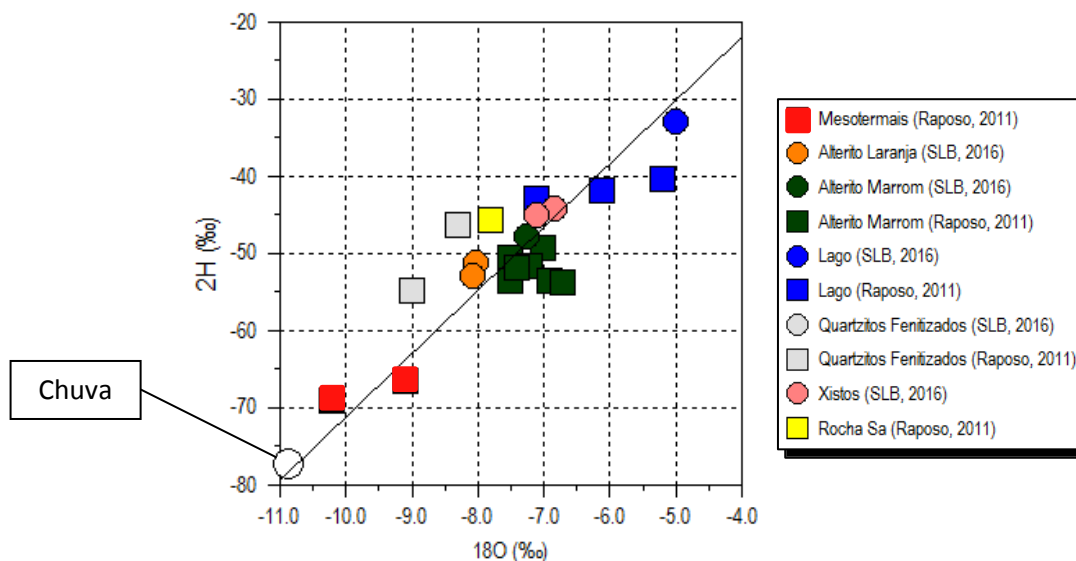


Figura 5.16 – Gráfico comparando os resultados de oxigênio-18 e deutério

A amostra de chuva incluída nas análises posiciona-se sobre a linha meteórica global, indicando que esta linha poderia ser considerada como referência para a água meteórica da área de interesse. Entretanto, cabe ressaltar que a análise de apenas uma amostra da água de chuva pode não ser suficiente para a avaliação. O fato de esta amostra estar relativamente menos enriquecida pode indicar apenas uma questão de sazonalidade climática na região. Clark & Fritz (1997) determinaram que a variação isotópica da água de chuva pode variar com a sazonalidade, podendo haver variação nesta composição até mesmo ao longo de um mesmo evento de precipitação. A amostra coletada no Lago da barragem B7 (SLB, 2016) é a mais enriquecida nestes isótopos, demonstrando a potencial variação na composição isotópica da precipitação ao longo da linha meteórica ou pode estar relacionada à evaporação.

Ainda sobre o gráfico da figura 5.16, observa-se que os pontos se distribuem de forma agrupada, de acordo com o tipo litológico de origem. Isto demonstra que a água que flui pelos alteritos do CACB está em um sistema de fluxo distinto da água subterrânea encontrada na parte exterior ou fora do anel de quartzitos. Este mesmo entendimento aplica-se às amostras de águas mesotermiais, realizadas por Raposo (2011), ou seja, estas águas realizaram recarga em condições distintas das demais amostras.

Os resultados de oxigênio-18 e deutério permitem ainda a interpretação quanto a dois pontos adicionais, listados a seguir:

- As amostras coletadas por Raposo (2011) em poços nos quartzitos fenitizados apresentam enriquecimento em deutério em relação à linha meteórica global. Este comportamento pode ser explicado pela interação química entre a água de minerais

silicáticos, presentes no quartzito. Clark & Fritz (1994) demonstraram que a reação com aluminosilicatos, para a formação de argilominerais, tende a gerar certo enriquecimento em deutério na água.

- Três das quatro amostras de lagos apresentam-se enriquecidas em oxigênio-18 em relação à linha meteórica global. Isto demonstra que a evaporação tem efeito sobre a composição isotópica destas águas.

### 5.5.2 – Trítio

Para obter a determinação da idade da água subterrânea com base em um resultado de trítio, faz-se necessário entender as variações ao longo do tempo nas concentrações de trítio na água meteórica da área de interesse, considerando também a taxa de decaimento deste isótopo desde a recarga.

No estado de Minas Gerais, Mourão (2007) realizou um estudo para obter uma estimativa dos dados de monitoramento de trítio na água meteórica coletados em distintas localidades do Brasil e do hemisfério sul, para estimar as variações nas concentrações deste isótopo na água meteórica na região da Serra da Moeda (localizada 320 km a leste do CACB).

O método de interpolação utilizado por Mourão (2007) foi adaptado a este estudo com o intuito de estimar as variações ao longo do tempo nas concentrações de trítio na água meteórica em Araxá. As estações consideradas por Mourão (2007) para extrapolação dos dados foram: Kaitoke, Nova Zelândia (com dados oriundos de período de monitoramento entre 1960 e 1987), Brasília (monitoramento entre 1965 e 1976), Porto Alegre (monitoramento entre 1958 e 1959, e entre 1965 e 1983), Rio de Janeiro (monitoramento entre 1965 e 1976) e valores representativos do Hemisfério Norte (dados entre 1953 e 1987). Com base nestes dados, Mourão (2007) estimou as concentrações de trítio na água meteórica precipitada para Brasília e Rio de Janeiro, nos anos em que não há dados de trítio disponíveis para estas estações.

Utilizando-se deste método para a região de Araxá, estabeleceu-se a seguinte equação de interpolação de concentrações de trítio em água meteórica, com base na distância entre esta região e as estações do Rio de Janeiro e Brasília:

$$\text{Trítio}_{\text{Araxá}} = 0,53\text{Trítio}_{\text{Rio de Janeiro}} + 0,47\text{Trítio}_{\text{Brasília}} \quad (11)$$



A partir dos dados monitorados e estimados para as estações do Rio de Janeiro e Brasília, estimou-se a concentração de trítio na água meteórica em Araxá para os anos entre 1953 e 1987.

Para a estimativa da concentração entre 1987 e 2016, considerou-se o resultado de trítio para amostra de água da chuva (1,0 UT), coletada no presente estudo no ano de 2016, estabelecendo-se uma equação exponencial que permitiu estimar as concentrações de trítio na água meteórica em Araxá, neste período:

$$\text{Trítio} = 4,087e^{-0,047t} \quad (12)$$

Onde: t representa o tempo (em anos) desde o ano de referência até o ano de coleta da amostra (2016).

As concentrações de trítio, entre 1953 e 2016, estimadas para a água meteórica em Araxá são apresentadas no Apêndice F.

O gráfico da figura 5.17 demonstra a variação das concentrações de trítio estimadas para a água meteórica da região de Araxá, ao longo dos anos.

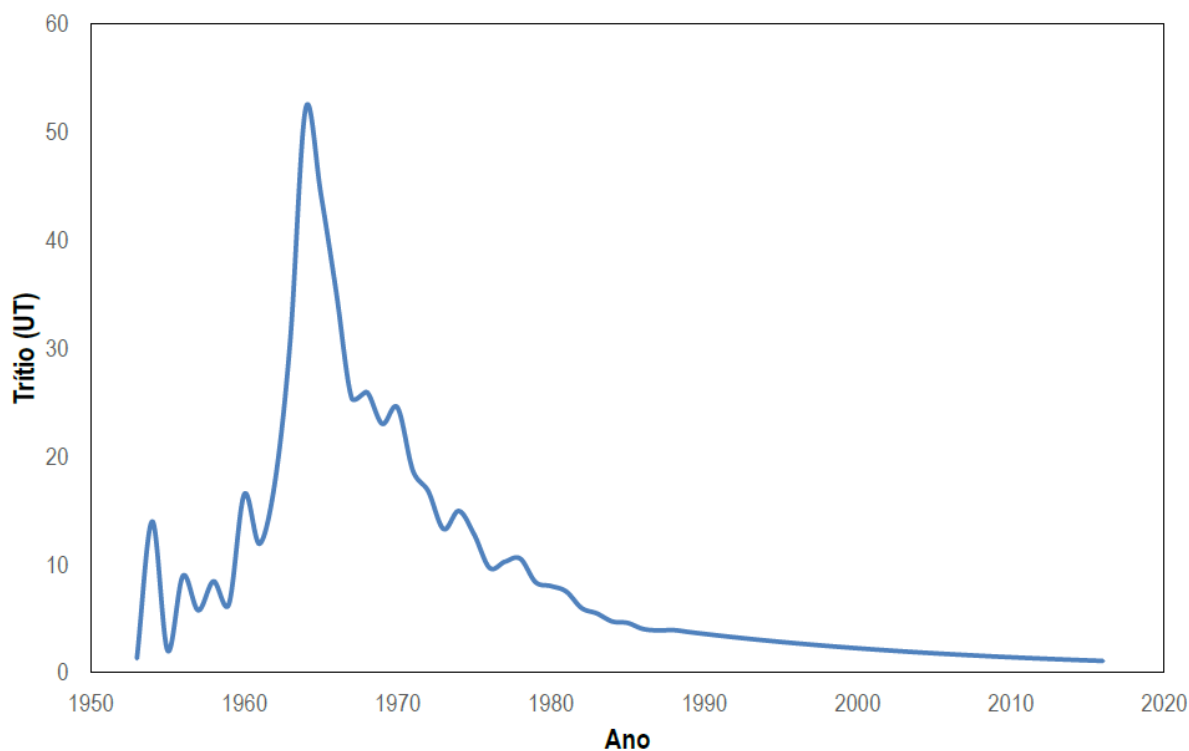


Figura 5.17 – Concentrações de trítio na água meteórica de Araxá entre 1953 e 2016.

As concentrações sofrem significativa elevação nas décadas de 50 e 60, em decorrência dos testes nucleares com bombas de hidrogênio e o subsequente decaimento. Esta tendência é observada em estações de monitoramento em todo o mundo, conforme discutido por Clark & Fritz (1997).

Para associar um resultado de trítio a uma idade, considerou-se a equação de decaimento do trítio (Clark & Fritz, 1997):

$$\text{Trítio}_{\text{amostra}} = \text{Trítio}_{\text{recarga}} 4,087e^{-0,05576t} \quad (13)$$

\*Onde t representa o tempo (em anos) desde o ano da recarga da água meteórica até o ano de coleta da amostra.

A tabela 5.6 mostra os resultados de trítio, juntamente com a idade estimada para cada ponto. Os resultados de trítio obtidos com os dois estudos estão em concordância, tendo em vista que todas as amostras coletadas em ambos os estudos da área de ocorrência dos alteritos no CACB apresentaram resultados de trítio inferior a 0,8 UT, o que indica a idade estimada superior a 50 anos, ou seja, tratam-se de águas “submodernas”. Já nos pontos posicionados fora desta área, em especial nos quartzitos, os resultados de trítio ficaram acima deste valor, indicando que as águas são mais recentes, com idade de recarga entre 10 e 40 anos, a depender do ponto.

Tabela 5.6 – Idades estimadas para cada ponto

<b>Amostra</b>	<b>Ponto</b>	<b>Ano em que amostra foi coletada</b>	<b>Conc. Trítio (UT)</b>	<b>Ano de recarga (estimado)</b>	<b>Idade estimada (anos a partir de 2016)</b>	<b>Litologia</b>
P-1	Poço Andrade Jr.	2011	< 0,2	Anterior a 1953	Superior a 60 anos	Qzt. Fenit.
P-2	Fonte Paulo Cherulli	2011	< 0,2	Anterior a 1953	Superior a 60 anos	Qzt. Fenit.
P-3	Poço P-4	2011	1,68	1978	38	Alt. Marrom
P-4	BU06A	2011	1,67	1978	38	Rocha sã Frat.
P-5	Alto Paulista	2011	0,62	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Qzt. Fenit.
P-9	Poço P-1	2011	< 0,2	Anterior a 1953	Superior a 60 anos	Alt. Marrom
P-10	PP02	2011	< 0,2	Anterior a 1953	Superior a 60 anos	Alt. Marrom
P-11	PP3	2011	0,47	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Alt. Marrom
P-13	F. Dona Beja*	2011	0,76	1961	55	Alt. Marrom
P-15	PAP-7	2011	0,50	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Alt. Marrom
P-17	BEJA-1	2011	0,71	1961	55	Alt. Marrom
P-18	BEJA-2	2011	0,63	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Alt. Marrom
SWS-01	INA-06	2016	< 0,8	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Alt. Laranja
SWS-02	INA-05	2016	< 0,8	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Alt Laranja
SWS-03	NA-41*	2016	< 0,8	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Alt. Marrom
SWS-07	NA-13	2016	< 0,8	Anterior a 1960	Superior a 50 anos	Xistos
SWS-08	NA-1	2016	0,80	Entre 1988 e 1998	Entre 18 e 28 anos	Xistos
SWS-10	Chuva	2016	1,00	2016	0	-

\*Amostras no mesmo ponto

Estes resultados demonstram que, de forma geral, as águas que afloram em surgências localizadas na área de ocorrência dos alteritos do CACB possuem maior tempo de residência no meio subterrâneo em relação às águas das surgências posicionadas fora da área de ocorrência dos alteritos.

Esta diferença demonstra que na área externa ao CACB, o fluxo pelo meio subterrâneo se dá de forma mais restrita, pelas zonas fraturadas, e provavelmente mais próximas à superfície, do quartzito e do xisto. No caso das águas subterrâneas no CACB, o fluxo se dá pelos alteritos, os quais se comportam como um aquífero granular que se estende por uma área comparativamente maior às eventuais zonas fraturadas localizadas dos quartzitos e xistos.

Ressalta-se ainda que o quartzito atua como um divisor de fluxo de água subterrânea e, por este motivo, as surgências que ocorrem nesta litologia estão localizadas próximas a este divisor, fazendo com que o tempo de residência destas seja relativamente curto.

### 5.5.3 – Carbono-13

O isótopo carbono-13 é utilizado em estudos hidrogeológicos para determinar a origem (geralmente, orgânica ou mineral) do carbono dissolvido em água. O entendimento quanto à origem do carbono na água é fundamental para as interpretações e eventuais correções nos resultados de isótopos de carbono-14.

Na Figura 5.18 é apresentado o gráfico comparando os resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  com a razão de concentrações cálcio + magnésio / bicarbonato (em moles). Esta razão refere-se ao gráfico da Figura 5.9, sendo que um resultado de  $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{HCO}_3$  de 0,5 equivale a uma amostra posicionada exatamente sobre a linha “2:1”.

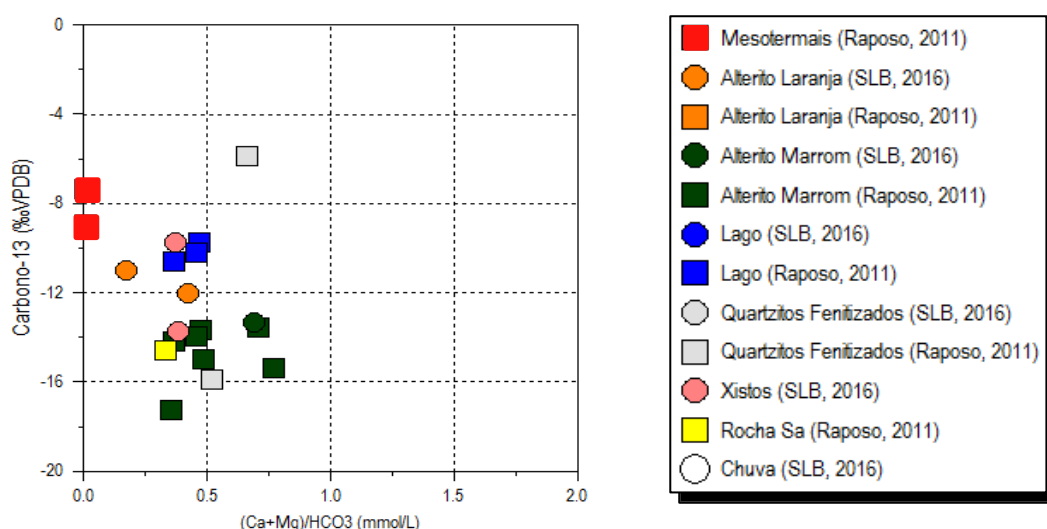


Figura 5.18 – Resultados de carbono-13 comparados com  $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{HCO}_3$  (mmol/L)

Avaliando-se a Figura 5.12, observa-se que parte significativa das amostras coletadas dos alteritos possui  $\delta^{13}\text{C}$  próximo à -14 ‰ e a razão de  $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{HCO}_3$  próxima à 0,5. O valor de  $\delta^{13}\text{C}$  de -14 ‰ equivale a valor próximo à média entre: o  $\delta^{13}\text{C}$  teórico para  $\text{CO}_2$  oriundo de matéria orgânica (-23 ‰) e o  $\delta^{13}\text{C}$  médio do carbonatito (conforme Santos & Clayton, 1995, entre -7,5 ‰ e -4,8 ‰; média entre estes dois valores de 6,15 ‰).

Neste contexto, resultados de  $\delta^{13}\text{C}$  próximos à -14 ‰ indicam dissolução de mineral carbonato na presença de  $\text{CO}_2$ , no entanto, em meio onde a fonte de  $\text{CO}_2$  é finita (ou seja, no aquífero em zona subjacente aos solos). Estes resultados corroboram com a interpretação ilustrada pela equação 10, a qual demonstra que, de forma geral, para as águas em questão, para cada 2 moles de bicarbonato em solução, 1 mole seria oriundo de  $\text{CO}_2$  orgânico e 1 de mineral carbonato.

Nota-se também que há algumas amostras coletadas por Raposo (2011) com  $\delta^{13}\text{C}$  inferior a -14 ‰. As águas nestes pontos possuem proporcionalmente mais carbono de origem orgânica.

Os resultados das amostras que apresentam valores de  $\delta^{13}\text{C}$  superior a -14 ‰ podem refletir distintos fatores, como: menor interação da água tanto com minerais carbonatos quanto com matéria orgânica, refletindo assim  $\delta^{13}\text{C}$  mais próximo do  $\text{CO}_2$  na atmosfera (no caso de amostras como salinidade muito baixa, como a coletada do INA-05 ou tempo significativamente maior de interação com minerais (águas mesotermiais).

De forma geral, os resultados de carbono-13 indicam que há certa interação das águas nos alteritos do CACB com minerais carbonatos. Estes resultados estão em concordância com as interpretações já apresentadas na análise de dados hidroquímicos. Estas interações são consideradas nas interpretações dos resultados de carbono-14.

#### 5.5.4 – Carbono -14

A Figura 5.19 mostra o gráfico comparando os resultados de carbono-14 (em pmC – *percent modern Carbon*) com a elevação do ponto amostrado, enquanto que a Figura 5.20 mostra um gráfico comparando o carbono-14 com o índice de saturação em relação à calcita.

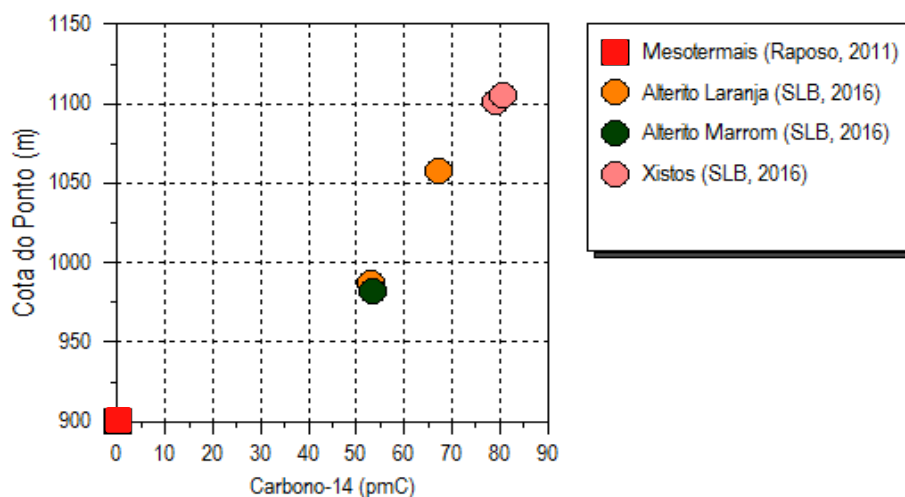


Figura 5.19 – Resultados de carbono-14 comparados com a cota do ponto amostrado

A Figura 5.19 demonstra que há uma forte relação entre a cota do ponto amostrado e as concentrações de carbono-14. Este gráfico poderia indicar que esta relação se deve ao decaimento do carbono-14 em solução conforme a água flui pelo meio, e alcança as porções de menor cota do CACB.

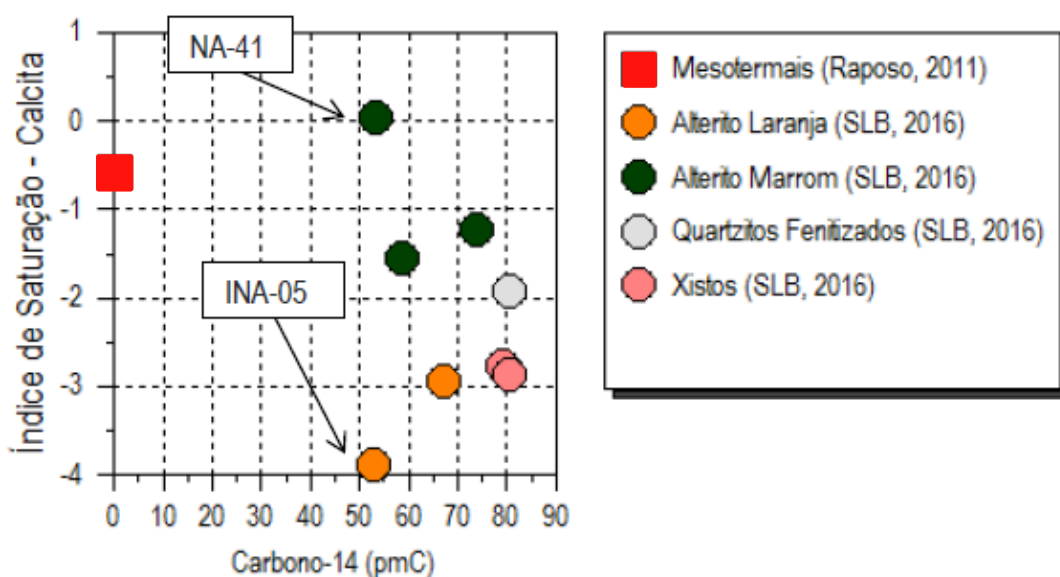


Figura 5.20 – Resultados de carbono-14 comparados com o índice de saturação em relação à calcita

Entretanto, a Figura 5.20 demonstra que na maior parte das amostras coletadas há também uma relação entre as concentrações de carbono-14 e o índice de saturação em relação à calcita. Este gráfico demonstra que ao menos parte significativa das reduções nas concentrações de carbono-14 nestas águas se deve à dissolução de minerais carbonatos. A exceção neste caso é a água mesotermal (que é conhecida mais antiga, conforme indicado por Raposo, 2011, e possui concentração de carbono-14 de 0,26 pmC).

Somando-se a isto, devem-se considerar também os resultados de trítio obtidos por Raposo (2011), os quais demonstram que parte significativa da água encontrada mais ao sul e na parte de menor cota topográfica do CACB possui idade estimada entre 50 e 60 anos.

Conforme demonstrado, a idade da água estimada para a amostra do Poço Andrade Jr. (coletada por Raposo, 2011), quando calculada considerando o  $\delta^{13}\text{C}$  do carbonato como sendo 0 ‰ é de aproximadamente 41.600 anos. Este resultado está dentro da faixa da idade estimada por Raposo (2011) para esta mesma amostra e por este mesmo método como sendo entre 40.250 e 42.468 (ressalta-se que Raposo, 2011 considerou o  $\delta^{13}\text{C}$  do carbonato como sendo 0 ‰). Considerando-se o  $\delta^{13}\text{C}$  do carbonato como sendo 6,15 ‰, obteve-se a idade de 34.700 anos para esta amostra. Apesar das diferenças entre estas estimativas, ambos os resultados demonstram que a água neste poço (água mesotermal) pode ser classificada qualitativamente, neste estudo, como sendo “antiga”.

Em todas as demais amostras coletadas no presente estudo, os resultados indicam que as águas são muito novas, ou seja, apresentam idades inferiores a poucos milhares de anos. Desta forma, estas águas podem ser classificadas qualitativamente como “modernas” ou “submodernas” a depender dos resultados de trítio.

#### **5.5.5 – Resumo dos dados de datação da água**

Comparando-se os resultados obtidos com o trítio e com o carbono-14, é possível dizer que, de forma geral, as águas coletadas no CACB são antigas o bastante para possuírem trítio abaixo do limite de detecção de 0,8 TU. No entanto, são águas muito novas para serem datadas por carbono-14. O quadro 5.1 mostra um resumo qualitativo das interpretações realizadas, a partir dos resultados de trítio e carbono-14.

Quadro 5.1 – Resumo dos dados de datação da água

<b>Tipo de ponto</b>	<b>Idade (qualitativo)</b>
Surgências aflorando na parte externa do CACB	Moderna
Surgências aflorando em alterito na porção norte do CACB	Submoderna
Águas mesotermiais	Antiga

Cabe ainda observar que os alteritos formam um aquífero, se não completamente, em grande parte, não confinado. Assim, espera-se que a recarga de água meteórica ocorra por toda (ou quase toda) a sua extensão. Portanto, é provável que a água possua componentes de fluxo de idades diferentes, ou seja, parte de água de uma determinada nascente pode ser oriunda de um fluxo mais profundo no perfil intemperizado e com tempo de residência maior. De outra forma, outra parte pode ser oriunda de fluxo mais localizado com recarga mais recente. A água que realiza descarga nas surgências é, então, resultado da mescla destes componentes.

## 6. MODELO HDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

---

De acordo com a avaliação dos dados gerados na etapa de caracterização, foi possível elaborar um modelo hidrogeológico conceitual para o CACB, representado pela seção hidrogeológica da figura 6.1, que foi preparada com base nos resultados hidroquímicos, isotópicos e hidrodinâmicos.

Os alteritos representam os principais aquíferos da área de estudo. São granulares e estão expostos nas áreas de mineração. Possuem coeficientes de permeabilidade que variam desde  $1,29 \times 10^{-5}$  m/s até  $7,82 \times 10^{-6}$  m/s, sendo capeados por solos argilosos menos permeáveis ( $8,7 \times 10^{-7}$  m/s), que funcionam como aquitardos, tornando os aquíferos semi-confinados, localmente. Segundo Raposo (2011), os aspectos estruturais (falhas e fraturas) mostram que existe uma anisotropia associada ao fluxo de água subterrânea e que há uma variação da condutividade hidráulica e da transmissividade, indicando que se trata de aquíferos heterogêneos. Entretanto, na indisponibilidade de ensaios que pudessem mensurar esta anisotropia nos três eixos, as unidades hidroestratigráficas foram consideradas, para efeito de simulação, como sendo isotrópicas.

Os furos de sonda que atravessaram todo o manto de intemperismo e interceptaram a rocha carbonatítica *sã*, mostram que esta é compacta, pouco porosa e fraturada, o que confere a esta litologia um caráter de aquífero fissural pouco expressivo. Os valores de condutividade hidráulica para esta unidade foram estimados em  $10^{-7}$  m/s.

Os xistos do Grupo Ibiá foram amostrados em campanhas de investigação e figuram, assim como a rocha carbonatítica *sã*, como um aquífero fissural, com condutividade da ordem de  $10^{-7}$  m/s

Os quartzitos fenitizados, por estarem posicionados em área de maior elevação topográfica, atuam como um divisor de fluxo de água subterrânea. A água meteórica que realiza recarga na parte do quartzito, externa ao CACB, flui em direção oposta a este. As nascentes posicionadas na parte externa ao CACB são aquelas que atuam como cabeceira das drenagens superficiais que fluem em direção oposta ao CACB antes de sofrer inflexão para o norte-nordeste (conforme descrito no item 2.5.2 deste trabalho). Estas surgências estão posicionadas relativamente próximas ao divisor de fluxo de água subterrânea e, por este motivo, as águas que afloram nestas são de idade “moderna”. O fluxo de água, por esta parte do meio subterrâneo, se dá principalmente de forma restrita por uma porção mais fraturada do quartzito.



Da mesma forma, as nascentes desta área, localizadas no xisto e próximas ao contato com o quartzito, são oriundas de fluxo localizado nas porções próximas à superfície do xisto, onde este tende a ser mais fraturado. Em função disto, as águas nestas nascentes são relativamente modernas, mas, por estarem posicionadas um pouco mais distantes do divisor de fluxo de água subterrânea, podem possuir tempo de residência comparativamente superior às águas que surgem no quartzito.

As nascentes encontradas na área de ocorrência dos alteritos estão posicionadas predominantemente na porção norte do CACB, ou seja, de forma geral, entre 4 a 5 quilômetros distantes do divisor de água subterrânea posicionado no extremo sudeste do CACB. Em função disto, as águas nestas surgências possuem componente de idade “submoderna”, o que demonstra que ao menos parte da água aflorando por estas fluiu por parte significativa do manto intemperizado do CACB antes de realizar descarga na superfície. Desta forma, pode-se afirmar que, de forma geral, as águas aflorando nas nascentes do alterito possuem maior tempo de residência do que, por exemplo, as surgências encontradas nos quartzitos. Ainda quanto ao fluxo subterrâneo no perfil intemperizado do CACB, cabe ressaltar que os alteritos atuam como uma unidade hidroestratigráfica aquífera não-confinada (ainda que em certas partes do CACB o solo sobrejacente, por ser argiloso, pode atuar como um aquitarde). Isto se dá, inclusive, pelo fato dos alteritos estarem expostos à superfície em parte expressiva do CACB em decorrência das atividades de mineração. Em função disto, há de se considerar que ao longo da extensão do CACB ocorre recarga de água meteórica moderna nos alteritos.

Quanto à hidroquímica, apesar dos alteritos possuírem, de forma geral, muito baixo teor de minerais carbonatos, os resultados físico-químicos da água indicam que estes estão presentes, ainda que de forma disseminada e em baixas concentrações, em ao menos parte do perfil intemperizado. A interação da água subterrânea com estes minerais faz com que o pH destas evolua gradualmente, de levemente ácido (refletindo o pH da água da chuva e/ou de água que interagiu com matéria orgânica nos solos durante recarga) para neutro a levemente básico.

Por fim, as águas mesotermiais que ocorrem no extremo noroeste do CACB possuem idade da ordem de 35.000 a 40.000 anos e são encontradas próximas à superfície em decorrência de falhamentos/fraturamentos profundos. Os resultados hidroquímicos e de isótopos, em sua totalidade, não mostram qualquer evidência de mescla ou interação no meio subterrâneo das águas mesotermiais com as águas que fluem pelo manto intemperizado.

O fluxo da água subterrânea é fortemente controlado pelas características hidrodinâmicas das litologias. A direção preferencial das águas que fluem no interior do CACB é de SE para NW, com a principal zona de descarga nas imediações da Estância hidromineral do Barreiro, mais especificamente nos córregos da Baritina e do Sal. Na porção mais elevada, representada pelo anel de quartzitos fenitizados, ocorre uma divisão do fluxo subterrâneo e a água flui de NW para SE, em direção à Barragem B7.

Diante do exposto acima, é possível realizar uma comparação entre este modelo conceitual e aquele proposto por Raposo (2011).

Para Raposo (2011), a recarga ocorre basicamente na porção S-SE do CACB e o fluxo subterrâneo principal segue a direção SE-NW. Em seu trabalho, Raposo (2011) também postula que as cavas das minas do interior do CACB, contribuem com a recarga, mas não foram encontradas águas recentes em poços profundos, apenas mistura. Além disso, as rochas carbonatíticas, incluindo o anel de quartzitos fenitizados, representam aquíferos isolados das rochas encaixantes, não recebendo água de fora. Devido à existência de vários córregos de padrão radial, cujas nascentes estão posicionadas na borda externa dos quartzitos, o domo carbonatítico contribui com a formação destas surgências.

Ainda segundo Raposo (2011), as descrições dos testemunhos de sondagem mostram que o principal aquífero é semi-confinado, contudo dois aquíferos subordinados também estão associados ao CACB, um deles no topo da rocha sã e o outro relacionado a um sistema de fraturas ou falhas profundas, com águas mesotermiais.

Portanto, pode-se dizer que os modelos conceituais propostos por Raposo (2011) e por este trabalho estão bem alinhados, abordando o contexto hidrogeológico, sobretudo no que concerne ao fluxo subterrâneo, de maneira bastante similar.

Entretanto, algumas discordâncias entre os modelos conceituais podem ser também verificadas, principalmente a respeito da nomenclatura dos litotipos. Raposo (2011) cita que os silexitos, associados ao saprolito marrom, conferem a este litotipo o status de principal aquífero, devido à sua alta porosidade. Ademais, observou que, localmente, as elevadas vazões em poços tubulares profundos estão associadas às zonas com presença de silexitos dentro do saprolito marrom.

Durante o modelamento geológico deste trabalho, os silexitos não foram levados em consideração, uma vez que, estes não ocorrem de forma tão relevante na área estudada, ou seja, não figuram como uma unidade bem definida sob a mina da CBMM, assim como observado nas áreas estudadas por Raposo (2011). Por isso, estas unidades foram

desconsideradas neste trabalho, por possuírem um caráter de influência local, no que diz respeito ao fluxo subterrâneo.

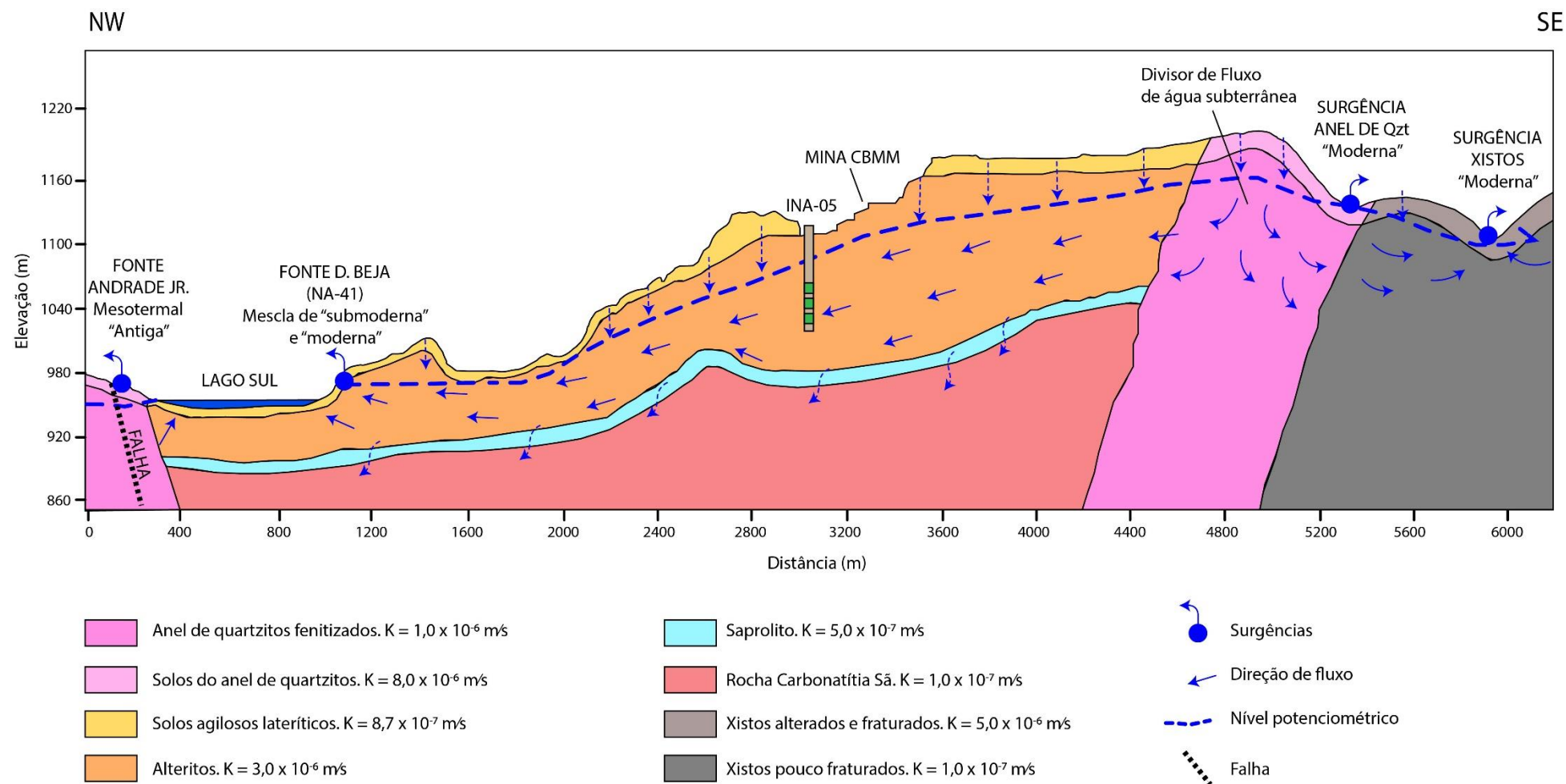


Figura 6.1 – Seção hidrogeológica conceitual

## 7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA EM REGIME PERMANENTE

---

Neste item serão apresentadas e discutidas as etapas do modelamento matemático em regime permanente, que busca reproduzir as características e processos propostos no modelo conceitual. Foi utilizado o software *Visual ModFlow*, versão 2011.1 *Premium*, build 4.6.0.162, com a matriz de solução o *Algebraic Multigrid Methods for System Solver (SAMG)*, utilizando o algoritmo *Modflow 2000*.

### 7.1 – Domínio do modelo

A definição da área modelada levou em consideração a extensão do CACB, bem como os limites das microbacias que drenam a região do domo. Portanto, o modelo cobre uma área de 75,2 Km<sup>2</sup>. Na direção vertical o modelo é limitado à cota inferior de 500 metros. Este limite foi definido levando-se em conta a profundidade máxima que a pesquisa geológica alcançou com alguns furos de sonda. Ademais, não se espera que os trabalhos de lavra se aprofundem de tal maneira a superar esta profundidade. O modelo possui 221 linhas, 250 colunas e 33 camadas, o que configura o total de 1.823.250 blocos.

Para a definição do limite superior do modelo, a topografia utilizada como base foi obtida por meio da restituição aerofotogramétrica realizada em meados de 2002. Esta condição representa bem a superfície topográfica no momento da calibração, realizada para o ano de 2006, uma vez que, não houve grandes modificações, dignas de observação, nas cavas das minas entre 2002 e 2006.

### 7.2 – Reprodução da Geologia e atribuição de parâmetros hidrodinâmicos

Para a atribuição da condutividade hidráulica no modelo numérico foram utilizadas nove zonas, que definem as litologias descritas no item 5.1. Os sólidos do modelo geológico foram criados no software *Minesight*, pela área de geologia da CBMM, e foram importados como arquivo \*.csv para o software *PETREL*. O arquivo possui as informações x, y e z do centro dos blocos, bem como a litologia associada a cada bloco. A partir de rotinas internas, o *PETREL* foi utilizado para exportar o modelo de blocos para o *Visual Modflow*. Como exemplo, a figura 7.1 apresenta as zonas de condutividade hidráulica aplicadas ao modelo na camada 8. É importante ressaltar que as cores atribuídas às *layers* são definidas automaticamente pelo software.

A tabela 7.1 mostra os valores de condutividade aplicados a cada zona, refletindo os testes de determinação da condutividade hidráulica do item 5.5. Alguns ajustes foram feitos durante o processo de calibração para adequar os *inputs* ao nível de calibração desejado.

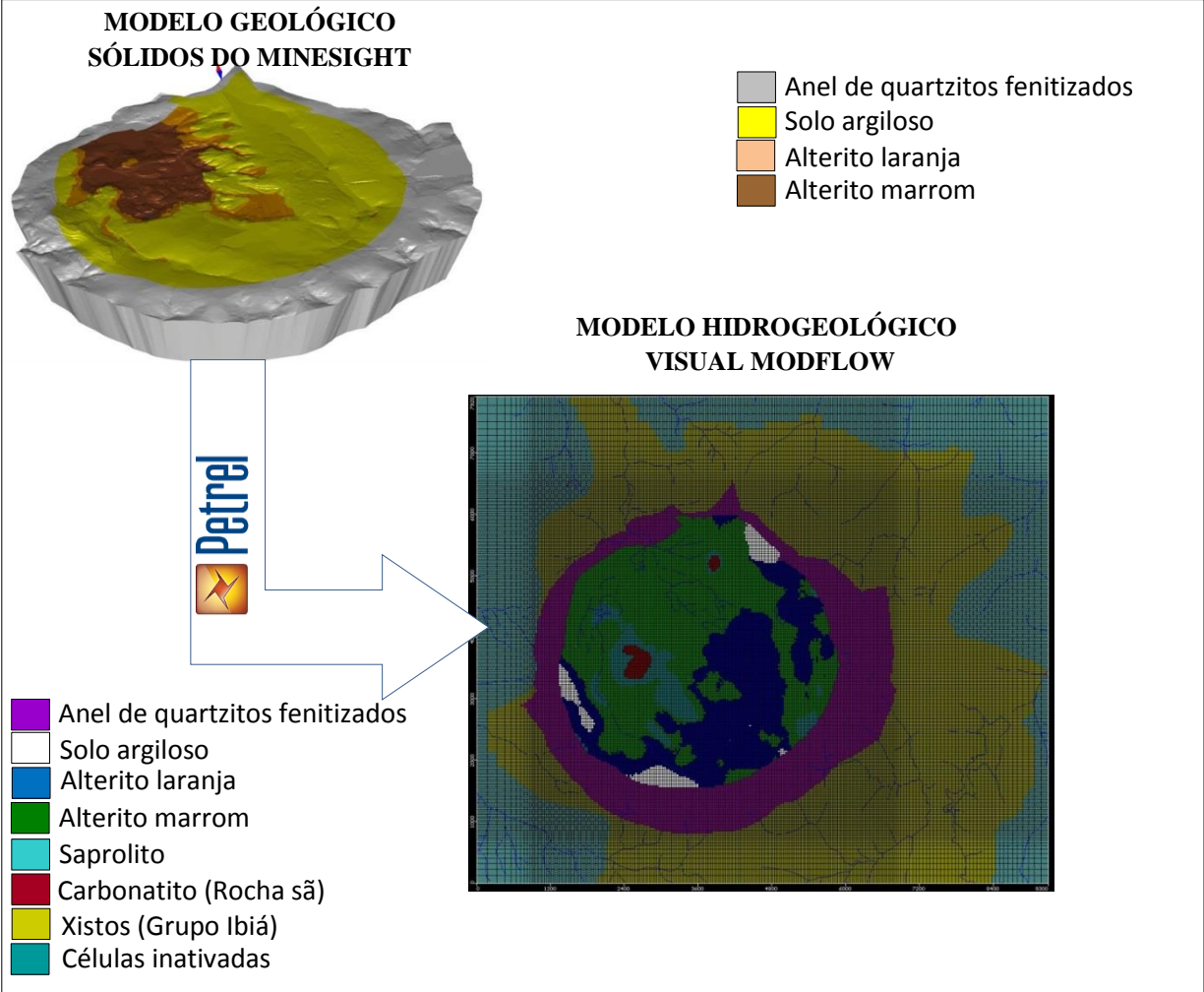


Figura 7.1 – Reprodução da geologia no Visual Modflow

Tabela 7.1 – Zonas de condutividade hidráulica do modelo

	Zona	Litologia	Kx [m/s]	Ky [m/s]	Kz [m/s]
	1	Solos argilosos	8.7E-07	8.70E-07	8.70E-07
	2	Alterito laranja	3.00E-06	3.00E-06	3.00E-06
	3	Alterito marrom	3.00E-06	3.00E-06	3.00E-06
	4	Saprolito	5.00E-07	5.00E-07	5.00E-07
	5	Carbonatito (Rocha Sã)	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07
	6	Anel de quartzitos	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
	7	Xistos (grupo Ibiá)	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-07
	8	Xistos alterados/fraturados	5.00E-06	5.00E-06	5.00E-06
	9	Anel de quartzitos alterados	8.00E-06	8.00E-06	8.00E-06

Uma visualização do perfil E-W sobre a mina, mostrando a distribuição da condutividade hidráulica é apresentada na figura 7.2. Este perfil corresponde à seção vertical na coordenada UTM Norte 7.824.414 m.

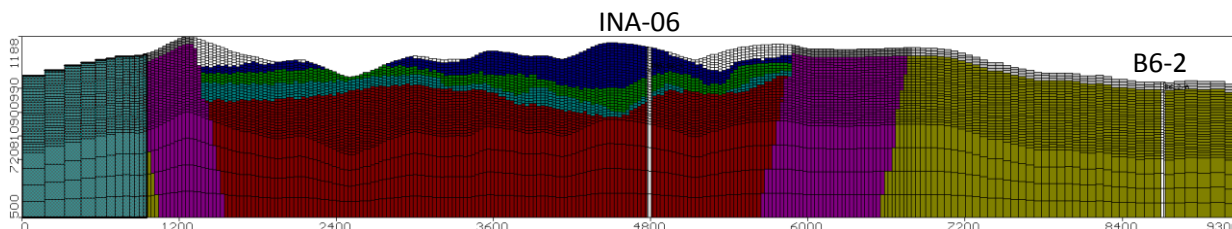


Figura 7.2 – Perfil E-W. Exagero vertical 2x.

### 7.3 – Condições de contorno

#### 7.3.1 – Zero Flow (*Fluxo nulo*)

Como o foco do modelo é o CACB e considerando que as rochas encaixantes possuem pequeno potencial aquífero, não houve a preocupação de estender o modelo muito além nas rochas encaixantes.

Desse modo, o limite oeste foi definido como a borda da cava da mina do Barreiro (Vale Fertilizantes). Algumas drenagens têm suas nascentes posicionadas nas proximidades do anel de quartzitos, nesta região. Entretanto, foram desconsideradas, uma vez que não há equipamentos de monitoramento (vertedouros) nestas drenagens. Apenas o córrego Capivarinha possui vertedouro. A área ativa foi considerada até este equipamento.

No limite leste foi considerada a microbacia do córrego Pirapetinga. Esta drenagem não possui vertedouro fluviométrico e, portanto, foi desconsiderada, ficando limitada às imediações da barragem B-7

O limite norte ficou caracterizado pela localização dos vertedouros que monitoram os córregos Feio, Mourão Rachado, Santa Rita e do Sal.

Ao sul, as microbacias dos córregos da Cava e Bocaina possuem vertedouros fluviométricos e por isso foram consideradas como zonas ativas do modelo.

A figura 7.3 mostra os limites das zonas de fluxo nulo, bem como a localização dos equipamentos de monitoramento do deflúvio (vertedouros fluviométricos).



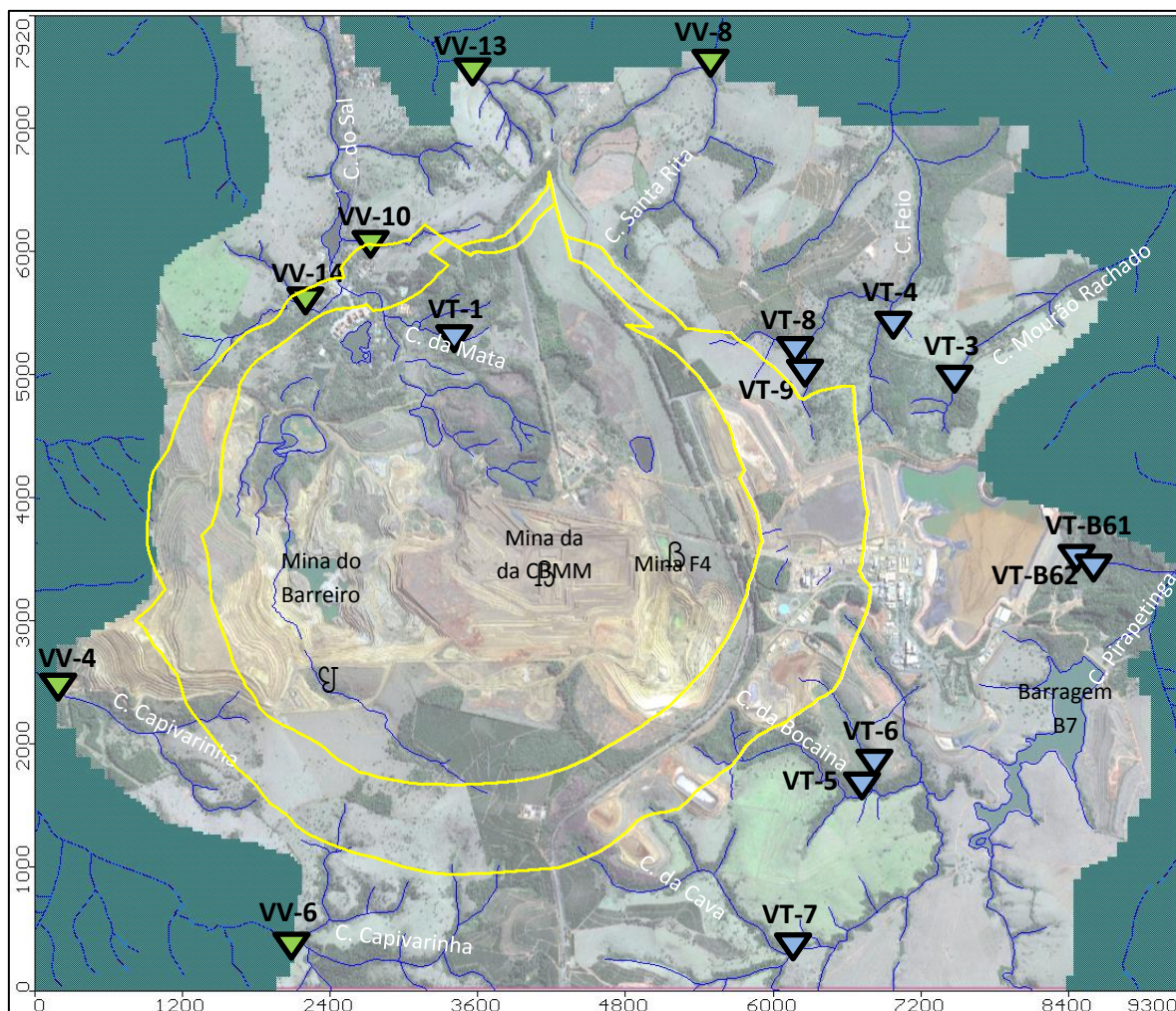


Figura 7.3 – Zonas inativadas (em verde escuro). Vértedouros utilizados como critério de delimitação. (triângulos verdes: monitorados pela Vale Fertilizantes; triângulos azuis: monitorados pela CBMM).

### 7.3.2 – *Recharge (Recarga)*

O cálculo da recarga foi realizado utilizando-se o método WTF (*Water Table Fluctuation*), o qual avalia a flutuação do nível de água em um poço de observação ao longo do tempo, estimando a recarga a partir desta variação.

Foram utilizados seis INAs para esta avaliação, cujas informações constam da tabela 7.2. Para o cálculo foram utilizadas as informações de precipitação e de nível de água observados entre os anos de 2013 e 2016. Por meio da análise da precipitação mensal verificou-se que as chuvas se concentram, principalmente, no período entre outubro e março, com ocorrência de estiagem nos demais meses, destacando-se o período entre junho e agosto como aqueles com o menor volume precipitado. Considerando-se o ano hidrológico como o



período entre agosto e julho o maior volume de chuvas ocorreu de agosto/2006 a julho/2007 com 1.802 mm precipitados, e o de menor valor foi de 1.285,3 mm (agosto/13 a julho/14).

Tabela 7.2 – Estimativa das taxas de recarga nos poços de monitoramento avaliados

PM	Litologia	Período	P (mm)	$\Delta h$ (m)	Recarga	
					(mm/período)	(%)
INA-01	Alterito Laranja	01/13 a 10/13	1113.3	2.53	177.1	15.9
INA-03	Alterito Laranja	11/14 a 07/15	1536.9	8.25	577.5	37.5
INA-04	Alterito Laranja	12/15 a 09/16	1387.4	3.77	263.9	19.0
INA-05	Alterito Laranja	10/13 a 10/14	1352.3	0.79	55.3	4.0
INA-14	Alterito Laranja	01/15 a 06/15	986.5	2	140	14.1
INA-17	Alterito Laranja	10/15 a 04/16	1514.2	2.44	170.8	11.2

Em média, a recarga é de aproximadamente 17% da precipitação. Este valor foi usado no modelo, perfazendo um valor de 270 mm/ano, frente à precipitação média de 1574 mm/ano mostrada no item 2.5.3 deste trabalho. À camada correspondente ao solo de alteração do anel de quartzitos fenitizados (Zona 9), foi aplicado um valor de 300 mm/ano, que corresponde à estimativa de um acréscimo de 5%, uma vez que, esta litologia apresenta-se intensamente fraturada, compondo um horizonte bastante arenoso.

### 7.3.3 – Módulo *Rivers e Constant Heads* (Rios e carga constante)

A condição de contorno *Rivers* foi atribuída nas células da primeira camada do modelo, simulando as principais drenagens monitoradas na área de estudo e acompanhando a cota topográfica dos talvegues. A principal propriedade que deve ser atribuída a este tipo de condição de contorno é a condutância, que descreve o nível de conectividade entre o contorno e a célula onde a condição de contorno foi atribuída (CARVALHO FILHO & COTA, 2003). A figura 7.4 mostra a distribuição das condutâncias aplicadas a cada curso, além do seu posicionamento. Os valores de condutância foram estimados e ajustados durante o processo de calibração. Esta estimativa se fez necessária, uma vez que, a determinação da condutância torna-se difícil em campo.

A condição de contorno *constant head*, pode ser usada para representar os pontos de carga constante no modelo. Foram utilizadas para representar os lagos da área de estudo. Nesta condição o parâmetro que deve ser atribuído é a cota da lâmina d'água do lago.

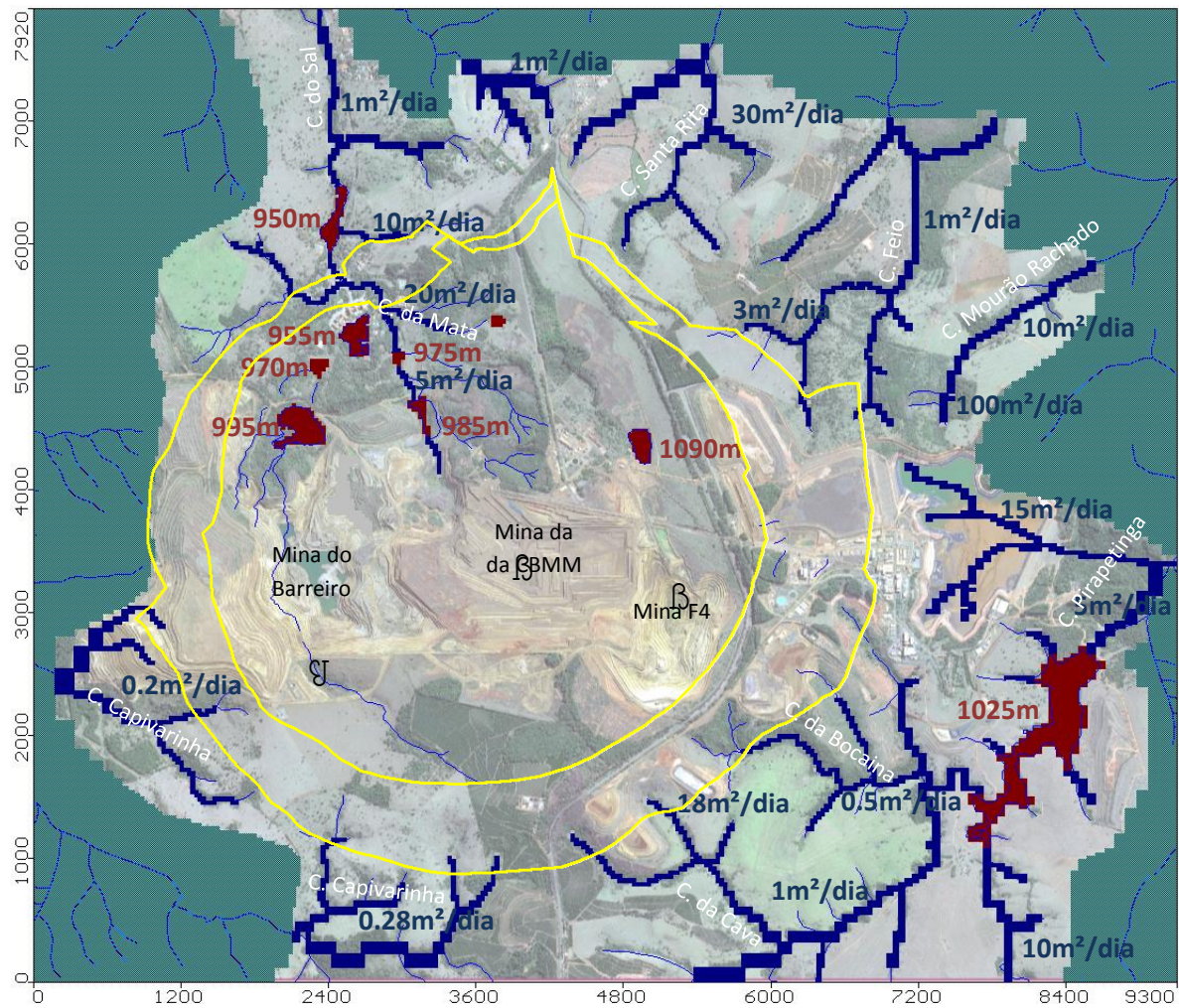


Figura 7.4 – Posicionamento das condições de contorno rios e cargas constantes

#### 7.3.4 – Módulo *Drains* (Drenos)

O módulo *Drains*, no *Visual ModFlow*, é usado para simular os efeitos que removem água do aquífero a uma taxa proporcional à diferença entre a carga hidráulica no aquífero e alguma carga fixa ou elevação (WATERLOO HYDROGEOLOGIC, 2000).

Analogamente ao módulo *River* as condutâncias para cada dreno devem ser definidas. A condutância é um coeficiente agrupado, que descreve a perda da carga hidráulica entre o dreno e o aquífero. Esta perda é causada pelo fluxo convergente nas proximidades do dreno. Segundo Waterloo Hydrogeologic (2000), não há uma formulação geral para calcular a condutância dos drenos, pois, na maior parte das situações, as informações necessárias para realizar este cálculo não estão disponíveis para o modelador. Dessa forma, a condutância dos drenos é normalmente ajustada durante a calibração do modelo.



Os drenos foram aplicados nas células que representam as nascentes cadastradas durante os trabalhos de inventário, descritos no item 5.3, que receberam valores variando entre 2 m<sup>2</sup>/dia a 5000 m<sup>2</sup>/dia. Esta variação busca representar desde as surgências de pouca expressividade local, até aquelas que retiram grandes quantidades de água do modelo.

#### 7.4 – Zone Budgets (Zonas de balanço hídrico).

Com o intuito de calibrar as vazões de descarga de água subterrânea nos córregos, representados pela condição de contorno *Rivers*, foram definidas 19 *zone budgets* (ZB), que foram associadas aos pontos de monitoramento de vazão (vertedouros fluviométricos). O mapa da figura 7.5 apresenta as ZBs definidas no modelo e o quadro 7.1 a descrição das mesmas.

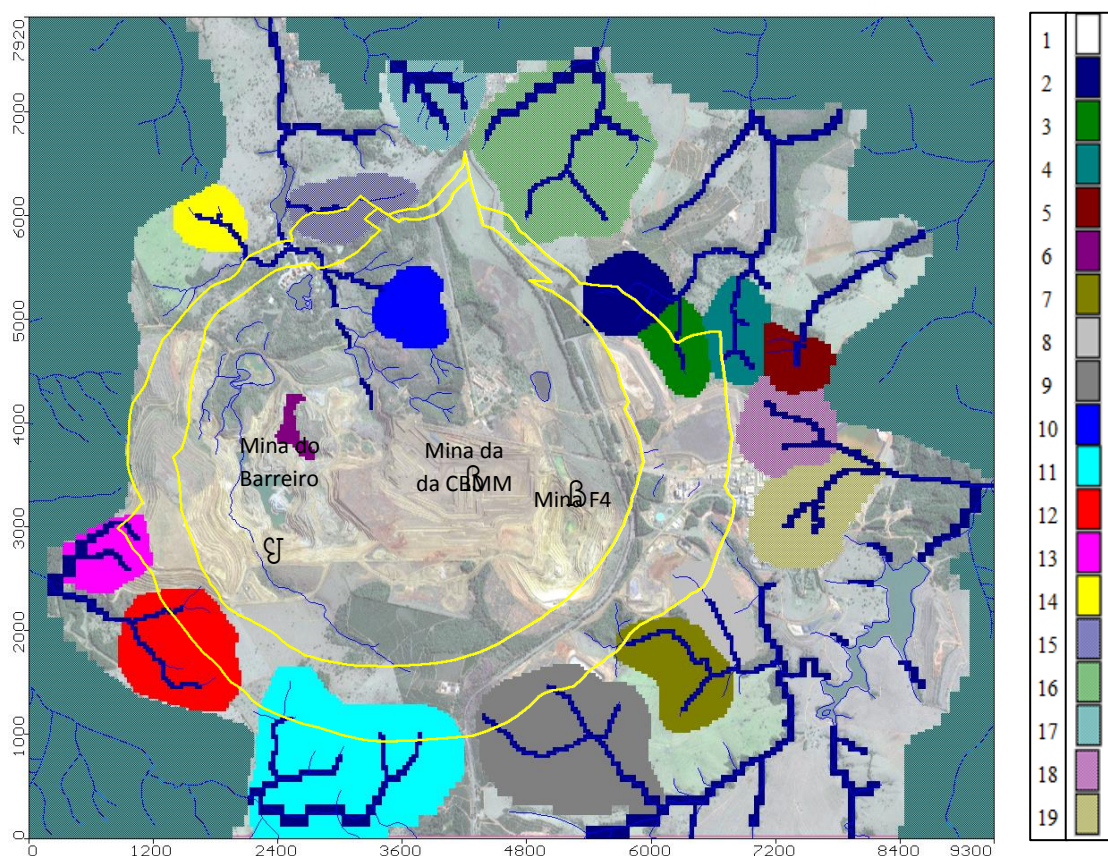





















Figura 7.5 – Zone Budgets definidas

Além das bacias dos vertedouros, foi criada uma ZB para representar a retirada de água do modelo pelos trabalhos de rebaixamento da cava da Mina do Barreiro, que eram realizados por meio de canaletas de drenagem superficial.

Quadro 7.1 – Descrição das *Zone Budgets* definidas

Zona	Cor	Descrição
1		Geral
2		Córrego Feio - a montante do VT-08
3		Córrego Feio - a montante do VT-09
4		Córrego Feio - a montante do VT-04
5		Córrego Mourão Rachado - a montante do VT-03
6		Cava do Barreiro - Canaletas de drenagem superficial
7		Córrego Bocaina - a montante do VT-06
8		Córrego Bocaina - a montante do VT-05
9		Córrego da Cava - a montante do VT-07
10		Córrego da Mata - a montante do VT-01
11		Córrego Capivarinha - a montante do VV-06
12		Córrego Capivarinha - a montante do VV-04
13		Córrego Capivarinha - a montante do VV-03
14		Córrego dos Borges - a montante de VV-14
15		Córrego do Sal - a montante do VV-10
16		Córrego Santa Rita - VV-08
17		Córrego do Sal - a montante do VV-13
18		Córrego Santa Luzia - a montante do VT-B6-1
19		Córrego Santa Luzia - a montante do VT-B6-2

## 7.5 – Calibração do modelo matemático

A calibração do modelo matemático foi realizada em regime permanente considerando a situação inicial do aquífero em agosto de 2006. Tanto a superfície do nível de água subterrânea, e consequentemente do fluxo, como as descargas nas nascentes e córregos, foram utilizadas para a calibração do modelo nesta etapa do trabalho.

### 7.5.1 – Carga Hidráulica

Para a calibração da carga hidráulica foram utilizados os dados de 135 poços de monitoramento instalados na área de estudo. O período escolhido para a calibração do modelo foi definido de acordo com a compilação dos dados de observação dos níveis históricos nos poços. Para que a condição do modelo seja considerada permanente é necessário que os equipamentos de medição apresentem dados relativamente estáveis entre as suas leituras.

Dessa forma, as informações obtidas com o monitoramento dos níveis em poços, desde meados da década de 1980, foram compilados e o que se verificou, de uma maneira geral, foi um decréscimo contínuo dos níveis do início da década de 1980 até o ano de 2006. A partir de agosto deste ano há uma estabilização dos níveis em vários equipamentos (linha tracejada nos gráficos da figura 7.6). Este fato pode estar relacionado com as atividades de rebaixamento executados durante a lavra da mina do Barreiro, operada à época pela Fosfertil. Estes trabalhos, conforme consta dos históricos, terminaram no ano de 2006. Os gráficos da figura 7.6 exemplificam esta proposição. Estes poços foram escolhidos para exemplificar, uma vez que, possuem as séries históricas mais longas.

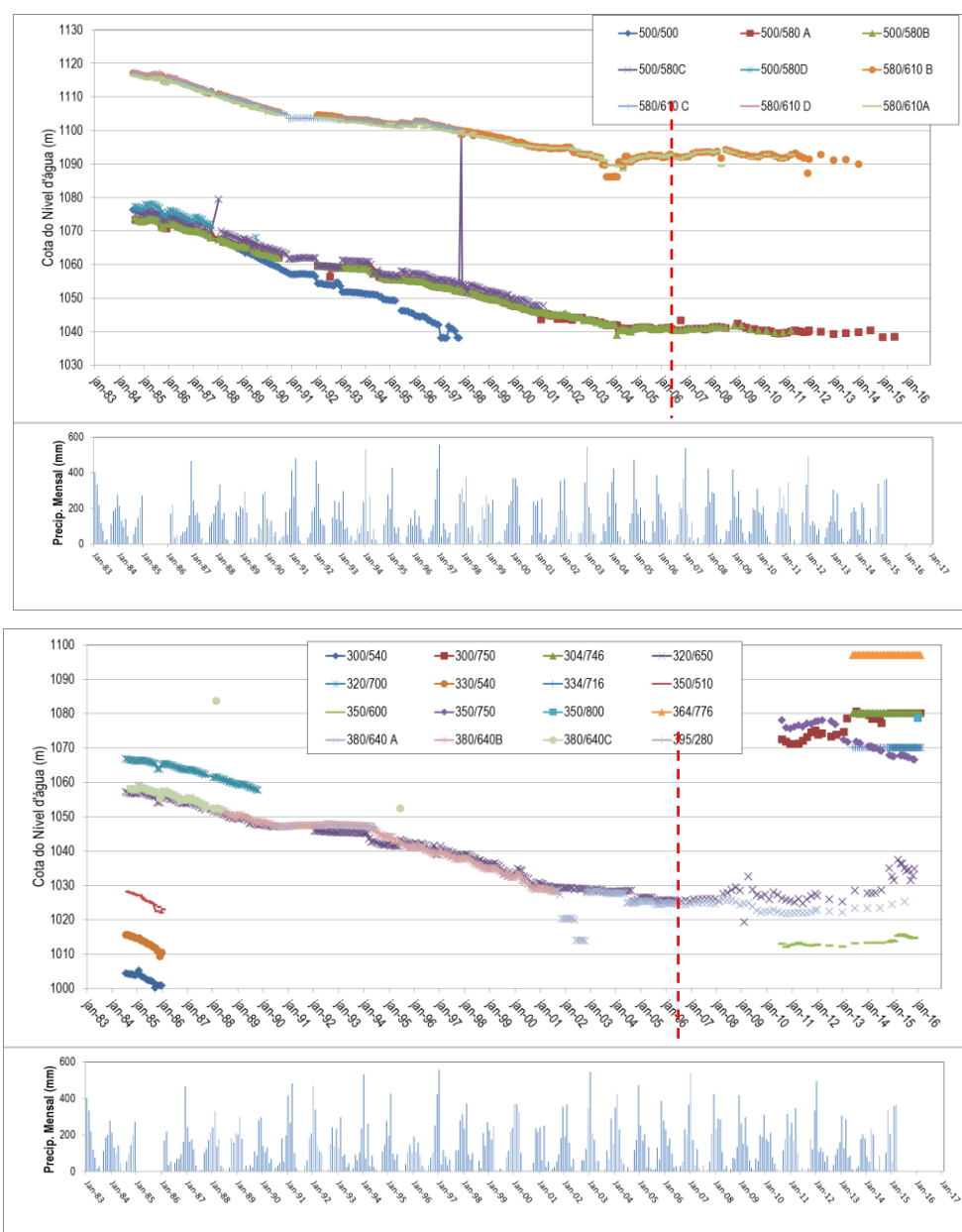


Figura 7.6. Gráficos de evolução do nível de água em INAs entre janeiro de 1983 e janeiro de 2016

A diferença residual entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas varia de -19,71 metros a 38,95 metros, com média de 5,38 metros. O gráfico da figura 5.29 mostra o histograma da distribuição da diferença residual das cargas hidráulicas nos poços. Idealmente, a distribuição desta diferença deve ser similar à curva de distribuição normal, com a maior parte dos grupos de dados agrupados ao redor do valor zero (WATERLOO HYDROGEOLOGIC, 2000). Esta proposição pode ser verificada no histograma da figura 7.7, que mostra uma boa adequação à curva normal, mas com uma discreta assimetria positiva.

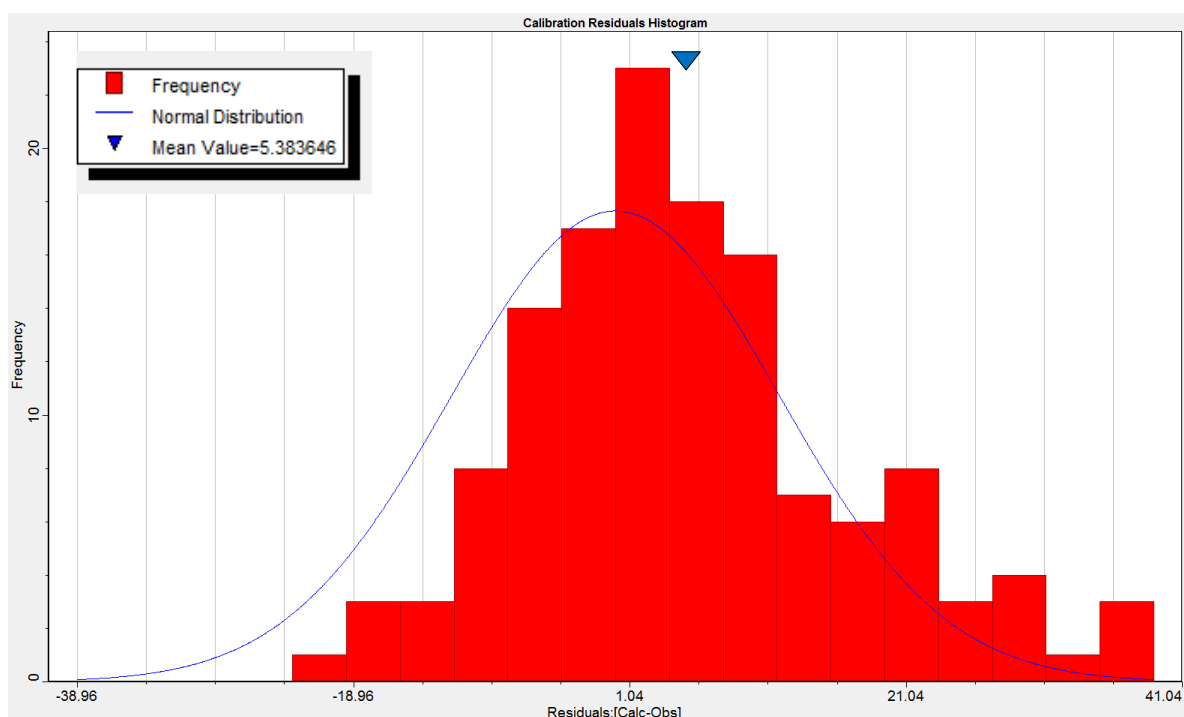


Figura 7.7 – Histograma das diferenças residuais entre as cargas hidráulicas calculadas e observadas

O gráfico da figura 7.8 mostra a calibração, em regime permanente, da carga hidráulica nos poços de monitoramento. Neste gráfico, os dados observados são plotados no eixo x e os valores calculados no eixo y. A reta bissetriz deste gráfico representa os pontos onde o dado observado é igual ao calculado ( $x = y$ ). Dessa forma, quanto mais próximos os pontos estão desta reta, melhor é o nível de calibração. O intervalo 95% (representado pelas linhas pontilhadas azuis) é aquele onde 95% do número total de pontos são esperados de ocorrer. Pode-se perceber uma boa adequação a esta proposição, uma vez que, a maior parte dos pontos está posicionada dentro deste intervalo.

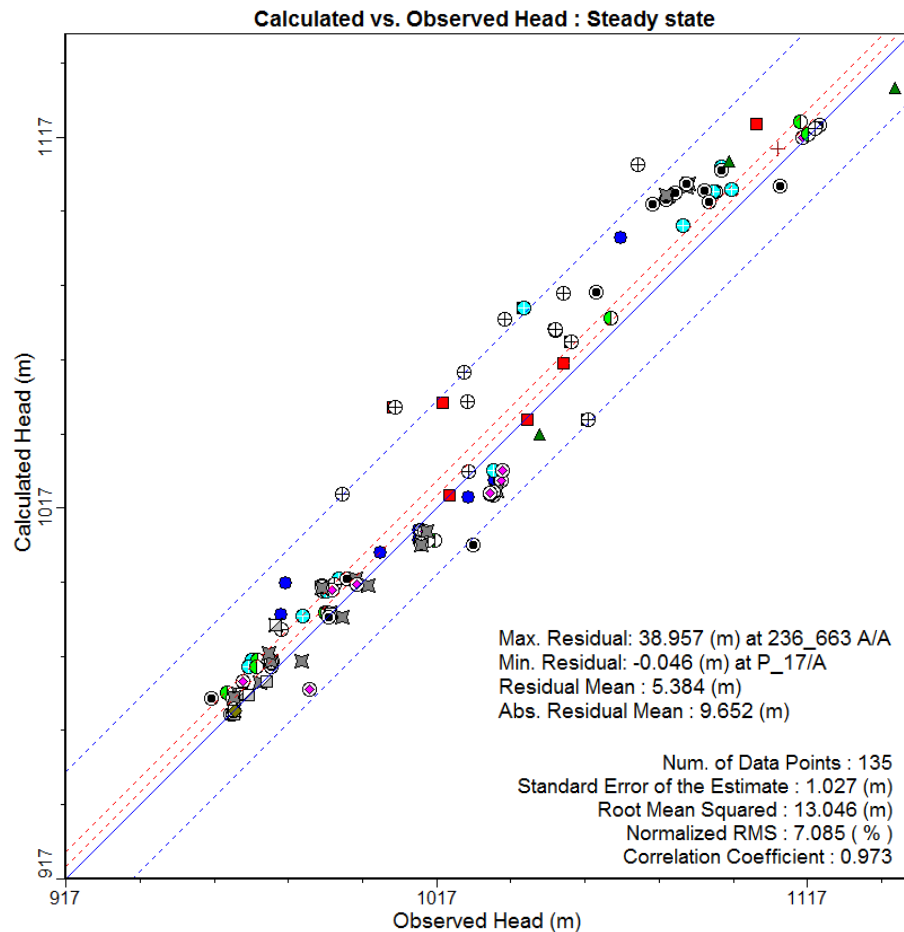


Figura 7.8 – Gráfico de calibração das cargas hidráulicas calculadas x observadas

Verifica-se, portanto, um nível satisfatório de calibração para a simulação, mas alguns instrumentos apresentam valores discrepantes de carga hidráulica, possivelmente devido a variações litológicas e hidrodinâmicas localizadas. Comumente, os dados estatísticos utilizados para a verificação do nível de calibração do modelo são o NRMS (*Normalized Root Mean Square*) e o Coeficiente de Correlação. O NRMS é normalmente expresso em porcentagem e indica baixa variância residual, quanto mais baixo for o seu valor. Já o coeficiente de correlação mede o grau de correlação entre duas variáveis em escala métrica.

Os resultados da simulação, mostrados no gráfico da figura 7.8, apresentam uma correlação de 97,3% entre os valores das cargas hidráulicas observadas e calculadas pelo modelo, bem como um valor de NRMS, de 7,08%. A análise destes índices indica que a simulação representa, de forma satisfatória, as condições reais da carga hidráulica observada, correspondendo à melhor situação de calibração alcançada.



A figura 7.9 apresenta o mapa da cota do nível de água calculado pelo modelo. É possível perceber que a superfície do nível de água acompanha a topografia e é mais elevado (entre 1130 e 1145) na porção sul-sudeste da área. As cotas mais baixas encontram-se na porção noroeste, nas proximidades da estância hidromineral do Barreiro (940 a 970 m).

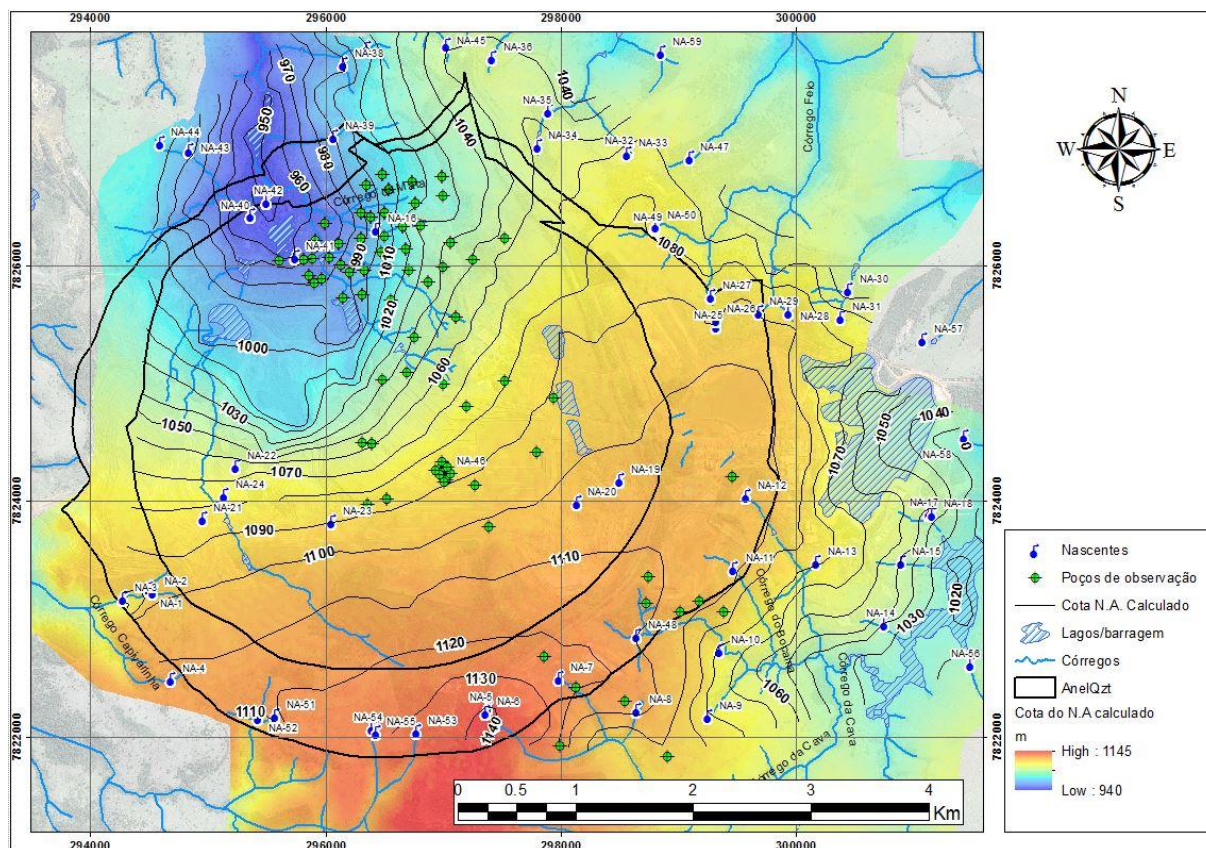


Figura 7.9 – Mapa potenciométrico calculado pelo *Visual ModFlow*.

De forma análoga, o mapa da figura 7.10 mostra o nível de água real, interpolado com os valores observados nos poços de monitoramento, além das cotas das nascentes mapeadas. Tanto os níveis mais altos quanto os mais baixos encontram-se posicionados nas mesmas áreas. Para esta interpolação foi utilizada o método *Natural Neighbors* do software ArcGIS. A sobreposição dos mapas potenciométricos real e simulado demonstra uma boa correspondência entre os dois e atesta a representatividade da simulação matemática.



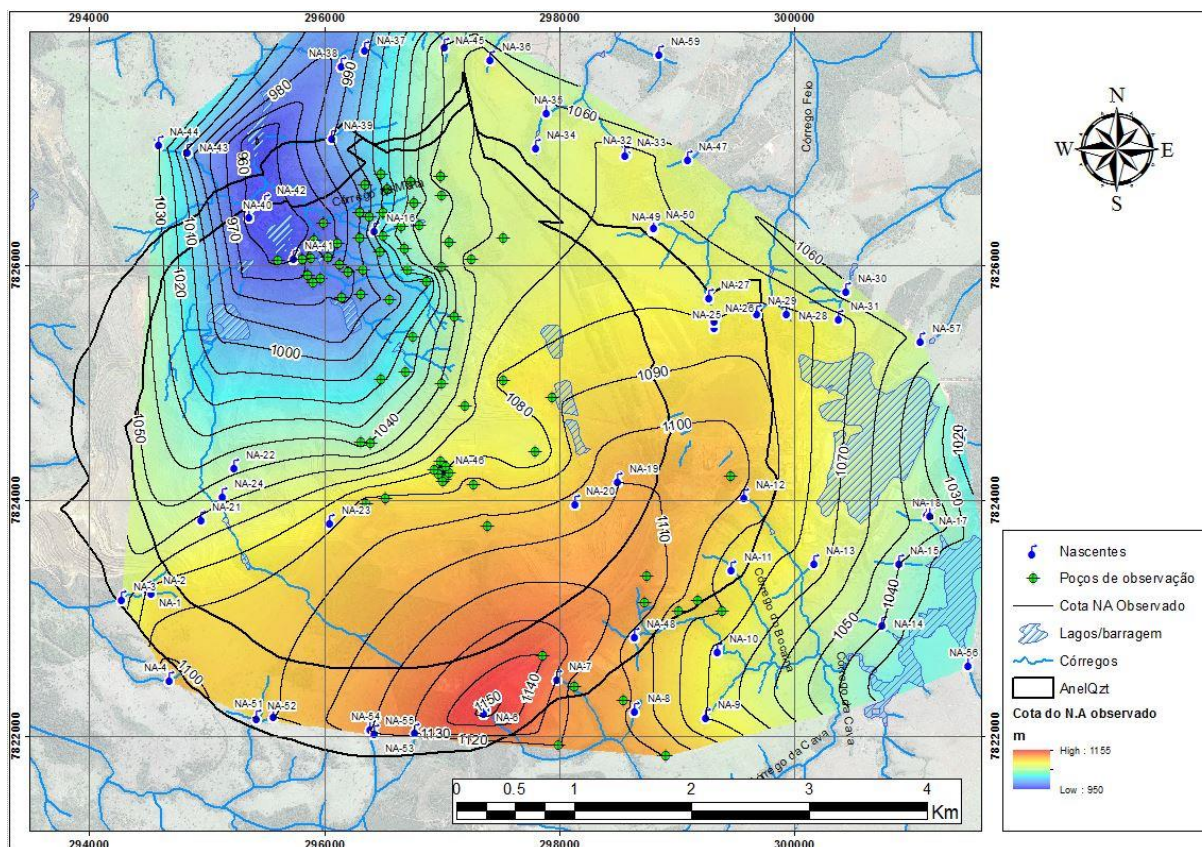


Figura 7.10 – Mapa potenciométrico gerado a partir dos dados observados

### 7.5.2 – Descarga de água subterrânea nos cursos de água.

Com o intuito de verificar as vazões de descarga nos córregos e nascentes, a calibração da descarga de água subterrânea nos cursos de água foi realizada utilizando-se as *Zone Budgets*, apresentadas no item 7.4. As vazões calculadas pelo modelo, em cada ZB, foram avaliadas e comparadas com os dados obtidos com o monitoramento dos vertedouros fluviométricos. O período avaliado foi o mesmo utilizado para a calibração dos níveis de água subterrânea, ou seja, o monitoramento de vazões realizado em agosto de 2006. A tabela 7.3 apresenta os resultados da calibração para cada ZB definida. Para o cálculo, o modelo leva em consideração as entradas e saídas na condição de contorno *River* (RIV IN e RIV OUT), além das saídas promovidas pelos Drenos (DRN OUT). A vazão calculada é obtida somando-se as saídas (RIV OUT e DRN OUT) e subtraindo as entradas no modelo (RIV IN). Para efeito de comparação o valor foi transformado e apresentado em metros cúbicos por hora.

Tabela 7.3 – Resultados do balanço hídrico

Ponto	ZB	Vazão obs. (m³/h)	Vazão Calc. RIV IN (m³/dia)	Vazão Calc. DRN OUT (m³/dia)	Vazão RIV OUT (m³/dia)	Vazão Calc. (m³/h)	Diferença (m³/h)
VT-08	2	24,89	0,00	84,25	258,77	14,29	10,60
VT-09	3	37,95	0,00	540,41	315,18	35,65	2,30
VT-04	4	26,14	0,00	77,27	398,94	19,84	6,30
VT-03	5	10,68	86,54	69,61	204,07	7,80	2,88
Cava Barreiro	6	200,00	0,00	0,00	4553,40	189,73	10,28
VT-06	7	69,90	19,78	577,80	1078,00	68,17	1,73
VT-05	8	27,22	0,00	368,09	244,52	25,53	1,69
VT-07	9	113,02	288,64	0,00	2525,40	93,20	19,82
VV-06	12	61,28	0,00	262,95	1991,50	93,94	-32,66
VV-04	13	30,78	0,00	385,85	554,77	39,19	-8,41
VV-03	14	17,19	0,00	0,00	454,10	18,92	-1,73
VV-14	15	14,78	78,77	0,00	192,41	4,74	10,05
VV-10	16	17,77	34,89	0,00	206,20	7,14	10,63
VV-13	18	28,50	0,17	23,87	579,00	25,11	3,39
V-B6_1	20	55,00	59,63	0,00	671,15	25,48	29,52
V-B6_2	21	70,00	58,62	0,00	1202,60	47,67	22,33

A diferença residual das vazões apresentou valores que variaram de -32,66 m³/h a 29,52 m³/h, com média de 5,5 m³/h. O gráfico da figura 7.11 mostra a comparação entre as vazões calculadas e observadas, apresentando uma correlação de 91,7%, o que garante à calibração das vazões, um grau de ajuste satisfatório para este modelo.

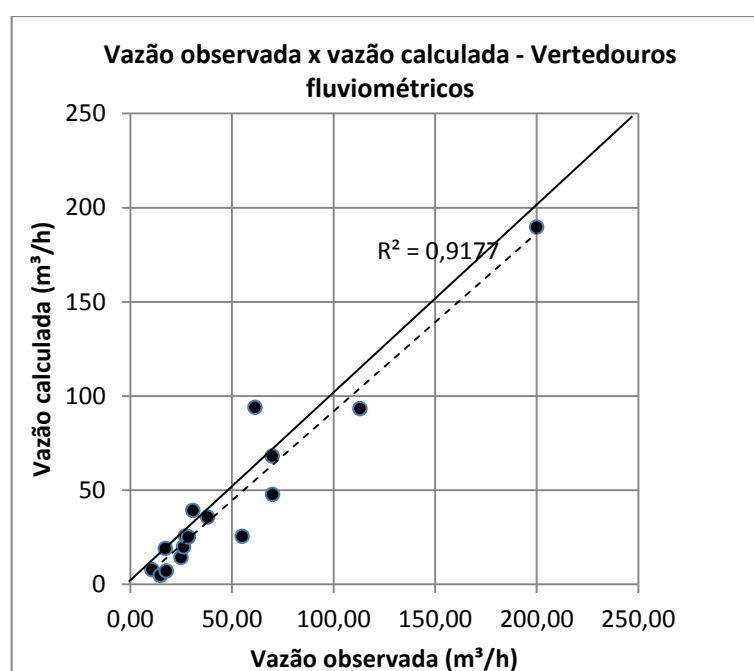


Figura 7.11 – Vazão observada x vazão calculada

### 7.5.3 – Balanço de Massa

O balanço de massa, normalmente, também é utilizado como um indicador do nível de calibração de um modelo hidrogeológico. O gráfico da 7.12 mostra o balanço de massa, relativo ao fluxo de água no modelo, representando as entradas e saídas nas condições de contorno (rios, drenos, recarga, poços, etc.). A recarga foi considerada como sendo a principal entrada de água no sistema e os rios como saída, com pequenas contribuições de poços, drenos e cargas constantes. A análise do gráfico, principalmente da coluna total, mostra que o balanço de massa, executado pelo modelo, apresenta-se equilibrado em regime permanente. A diferença residual calculada foi de 563,91 m<sup>3</sup>/dia, ou seja, 23,5 m<sup>3</sup>/h. Este valor equivale a um erro de aproximadamente 0,01%.

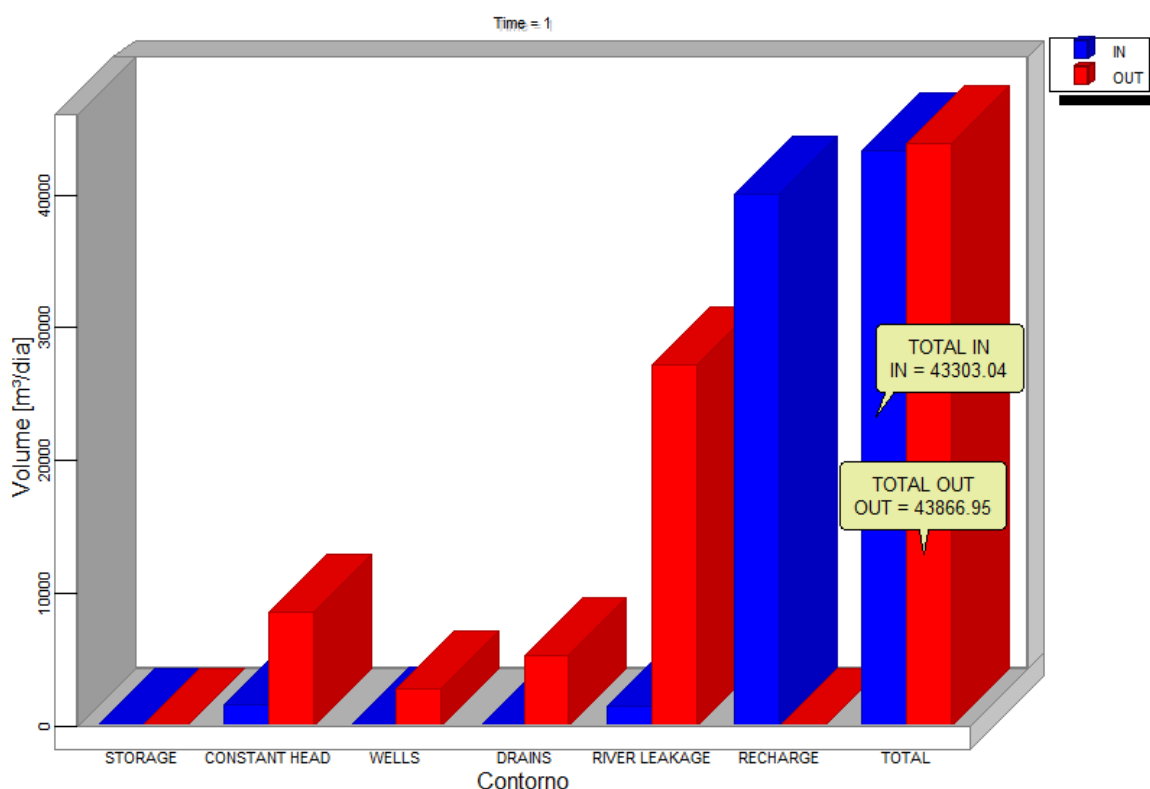


Figura 7.12– Balanço de massa calculado pelo *Visual ModFlow*

Portanto, é possível afirmar que o modelo se encontra com um bom nível de calibração, devido à elevada assertividade obtida no balanço de massa.

### 7.6 – Fluxo de água subterrânea

Um dos principais *outputs* do modelo é a representação dos vetores que simulam a projeção, a direção e a magnitude do fluxo da água subterrânea. Estes dados servem como um meio de verificação e comprovação das proposições elaboradas no modelo conceitual.



A figura 7.13 mostra o mapa de sentido das linhas de fluxo, aplicado à *layer* 10 do modelo, além de uma seção leste-oeste, passando pela mina. É importante ressaltar que as setas representam o sentido do fluxo e não a sua projeção ou magnitude. Esta última propriedade está, normalmente, relacionada às características hidrodinâmicas de cada litotipo (por exemplo: maior nos alteritos do que na rocha carbonatítica são).

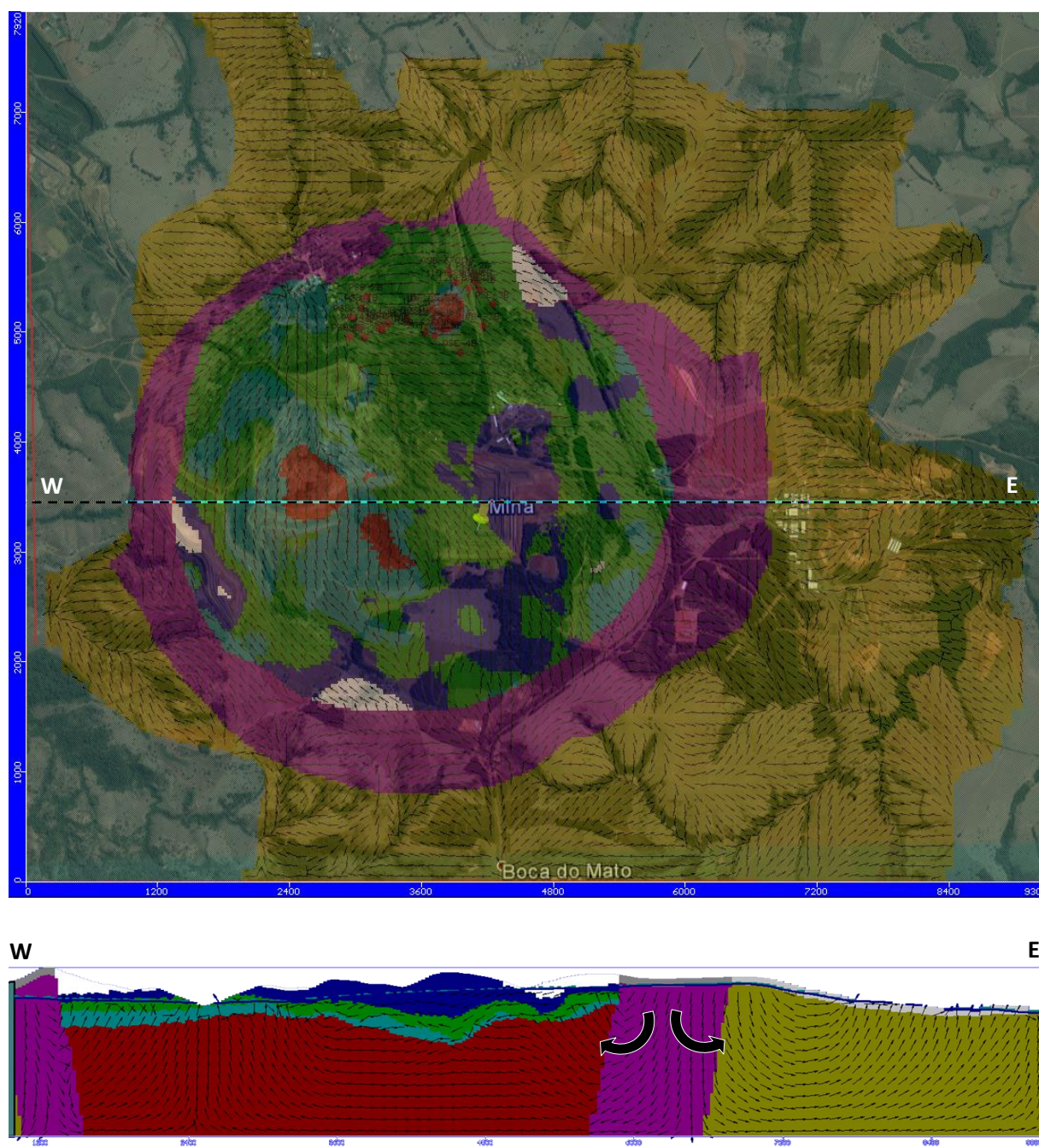


Figura 7.13 – Mapa e seção tipo das direções de linhas de fluxo. Seção com exagero vertical de 3x.

A análise do fluxo, em várias seções verticais e horizontais, proporcionou a possibilidade de verificar e comprovar a reprodução das principais proposições do modelo hidrogeológico conceitual para o fluxo.

Observando-se a porção sudeste do CACB, posicionada nas maiores elevações topográficas, é possível perceber que, no anel de quartzitos fenitizados, há uma divisão do fluxo de água subterrânea. Uma parte deste fluxo flui para dentro do CACB, passando pelos alteritos e seguindo na direção SE-NW, para a estância hidromineral do Barreiro, que se mostra, no modelo matemático (e no conceitual), como a principal zona de descarga de água subterrânea. A outra parte do fluxo flui para fora do CACB, na direção oposta, para as cabeceiras dos córregos que têm suas nascentes posicionadas no anel de quartzitos fenitizados e nos xistos do grupo Ibiá. Portanto, a hipótese, levantada na análise dos dados hidroquímicos e de isótopos, que demonstrava que o sistema de fluxo no manto de intemperismo do CACB não possuía interconexão significativa com as águas externas, foi reproduzida pelo modelo matemático de fluxo. As linhas ascendentes observadas na rocha carbonatítica também corroboram a proposição que Raposo (2011) faz no seu modelo conceitual, de que localmente ocorre uma condição de artesianismo nas imediações da Mina do Barreiro.

Entretanto, avaliando-se as fácies hidroquímicas discutidas no item 5.4 em conjunto com o as linhas de fluxo, pode-se verificar que há surgências na porção norte e nordeste da área (NA-32, NA-34 e NA-39), exteriores ao CACB, cujos diagramas de Stiff são similares aos das surgências posicionadas no interior do CACB. Portanto, pode-se afirmar que há uma interação entre as águas interiores e exteriores na porção norte, devido principalmente ao fluxo, que pode ser governado por falhamentos no anel de quartzitos e/ou pela dinâmica das microbacias existentes na região.

## 8 – CONCLUSÕES

---

Os resultados obtidos com este estudo demonstram que, com os trabalhos de caracterização, foi possível evoluir no entendimento dos mecanismos que regem o fluxo das águas subterrâneas no Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro e assim os objetivos foram alcançados.

De acordo com o modelamento geológico, foi possível individualizar oito unidades hidroestratigráficas na área de estudo: os solos argilosos que capeiam o CACB e funcionam como um aquítardo, confinando localmente os alteritos; os alteritos laranja e marrom que são considerados a principal unidade aquífera; o saprolito, que é a transição dos alteritos para a rocha carbonatítica sã, composto por materiais ricos em minerais micáceos e é considerado como sendo um aquítardo de alguns metros de espessura; a rocha carbonatítica sã, compacta e fraturada, configurando um aquífero fissural, localmente apresentando artesianismo; o anel de quartzitos fenitizados, que se comporta como um aquífero livre fraturado; os xistos do Grupo Ibiá, que são as rochas encaixantes do CACB e configuram um aquífero fissural pouco expressivo.

No que diz respeito aos testes utilizados para a determinação da condutividade hidráulica, estes se mostraram adequados e a sua aplicação determinou, de maneira satisfatória, os valores de K para as diversas litologias da área de estudo. É possível afirmar que os valores de condutividade hidráulica aplicados às litologias estão bem caracterizados, devido aos bons níveis de calibração obtidos durante a modelagem numérica. Os valores de condutividade hidráulica variam na área de estudo, desde valores da ordem de  $10^{-5}$  m/s, nos alteritos, até  $10^{-7}$  m/s nos xistos pouco fraturados do grupo Ibiá.

Com base nas análises hidroquímicas e de isótopos realizadas, tanto no interior do CACB, quanto na área externa, foi possível verificar que existem três fácies hidroquímicas na região:

- Águas interiores ao CACB – 1 grupo representado pelos poços e outro formado pelas surgências localizadas dentro dos limites do domo;
- Águas do anel de quartzitos fenitizados – representadas pelas nascentes posicionadas neste domínio litológico;
- Águas exteriores ao CACB – representadas pelas nascentes que ocorrem fora dos domínios do domo.

Já as águas mesotermiais, datadas por Raposo (2011) como “Antigas” (aproximadamente 40.000 anos), configuram uma anomalia no contexto hidrogeológico da área de estudo, uma

vez que, não foi possível relacionar, pelo menos neste trabalho, este grupo com nenhuma das outras fácies definidas.

Os dados de isótopos obtidos corroboram a caracterização feita por Raposo (2011), no que concerne às idades determinadas para as águas de surgências e poços, que possuem idade “submoderna”. Já as águas amostradas em nascentes posicionadas na área de ocorrência do quartzito fenitizado são “modernas”, com idade inferior a quatro décadas. Ainda quanto à idade das águas no alterito, é importante dizer que estas águas fluem por um aquífero não confinado, o que acarreta uma recarga de água meteórica ao longo de parte significativa da extensão do aquífero, principalmente devido à exposição desta litologia nas áreas de mineração. Portanto, as águas de nascentes dos alteritos podem ser consideradas como uma interação de águas submodernas, com águas que sofreram recarga mais recente, ou seja, águas mistas.

Os dados de oxigênio-18 e deutério demonstram que o sistema de fluxo de água subterrânea no manto de intemperismo do CACB não possui uma significativa interconexão com as águas externas ao domo. Esta proposição está em concordância com as interpretações conceituais da hidrogeologia da área, indicando que o anel de quartzitos fenitizados atua como um divisor de águas subterrâneas.

De acordo com dados mineralógicos e geoquímicos é possível afirmar que os alteritos possuem baixos teores de minerais carbonatos e, em certas porções, potencialmente não possuem estes minerais. Entretanto, os dados hidroquímicos demonstram que ao menos parte das águas subterrâneas, que fluem pelos alteritos sofre interação química com minerais carbonatos, em porções relativamente menos intemperizadas, onde pode haver carbonatos disseminados, mesmo que em concentrações baixas.

Este entendimento foi fundamental para as interpretações de resultados de carbono-14, que apresentaram valores baixos, decorrentes da dissolução de carbonatos na água e não do decaimento deste isótopo (com exceção da água mesothermal amostrada por Raposo, 2011). Portanto, as águas subterrâneas dos alteritos não possuem tempo de residência suficientemente longo para a datação precisa com o carbono-14.

O modelamento matemático do CACB foi realizado levando-se em consideração os dados gerados ao longo desta pesquisa. Os índices utilizados para medir a acurácia da calibração (NRMS = 7% e Coeficiente de Correlação = 97,3%) do modelo podem ser considerados satisfatórios, se comparados à grande quantidade de dados e a complexidade intrínseca do meio estudado. Além disso, os baixos níveis de erro do balanço de massa,

aliados à boa correlação nas descargas nos cursos de água (0,01% e 91,7%, respectivamente) corroboram a proposição de que o nível de calibração alcançado é satisfatório para este trabalho.

Os resultados do modelamento matemático, que dizem respeito ao fluxo, mostraram que o modelo se apresenta bem ajustado às interpretações realizadas durante a fase conceitual. A partir da região sudoeste da área de estudo, o fluxo da água, que flui para o interior do CACB, assume a direção SE-NW. A estância hidromineral do Barreiro pode ser considerada como a principal zona de descarga da região e possui as cargas hidráulicas mais baixas. As águas que fluem para fora do CACB, a partir do anel de quartzitos, assumem direção oposta e vão constituir as surgências que ocorrem nos xistos do grupo Ibiá.

Como sugestão para trabalhos posteriores, pode-se citar o modelamento em regime transitório, além das simulações de rebaixamento de nível de água subterrânea para o atendimento ao sequenciamento da lavra na mina de nióbio, que deverão ser realizados, a princípio, considerando o fluxo de água desde o divisor de fluxo posicionado nos quartzitos fenitizados, além da recarga de água oriunda da superfície, até a área da mina da CBMM, no interior do CACB. No entanto, conforme argumentado por Raposo (2011), a rocha carbonatítica *sã*, subjacente ao alterito e ao saprolito, se comporta como um aquífero fraturado em condições de artesianismo. Neste sentido, caso os planos de lavra de longo prazo visem o aprofundamento da cava até as proximidades do contato com a rocha carbonatítica *sã*, deverá ser considerada, no plano de rebaixamento e nos trabalhos de caracterização do meio, a possibilidade de interceptação ou despressurização de fluxo confinado em condição de artesianismo.

Além disso, é possível afirmar que a evolução no entendimento dos processos que regem o fluxo das águas subterrâneas no CACB, obtidas com este trabalho de pesquisa, é de extrema importância na gestão das áreas contaminadas, uma vez que, o modelo de fluxo servirá de base para a elaboração dos modelos de transporte de contaminantes, melhorando assim a abordagem dos trabalhos de remediação que se encontram em curso.



## 9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- ALMEIDA, F.F.M. 1967. **Origem e evolução da Plataforma Brasileira**. Rio de Janeiro, DNPM/ DGM. 36p. (Boletim 241).
- ALMEIDA, F. M. 1983. **Relações tectônicas das rochas alcalinas mesozóicas da região meridional da Plataforma Sul-Americana**. Rev. Bras. de Geociências, v.13, p. 139-158.
- ANDERSON, M. P., WOESSNER, W. M.1992. **Applied Groundwater Modeling**. Academic Press, Inc., California, 381p.
- ANDRADE JÚNIOR, J. F. 1925. **Reconhecimento geológico dos arredores de Araxá e outros pontos de ocorrência de águas minerais**. Ministério da Agricultura, Indústria e Commercio -Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. bol. n.9 - Contribuições à Geologia Econômica. Rio de Janeiro, p. 65-77.
- APPELO, C. A. J., POSTMA, D., & Geochemistry, G. 2005. **Pollution**. Taylor & Francis Group.
- APHA. 2012. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, DC: American Public Health Association.22ed.
- ARDEJANI, F. D., SINGH, R. N., BAAFI, E., & PORTER, I. 2003. **A finite element model to: 1. predict groundwater inflow to surface mining excavations**. Mine Water and the Environment, 22(1), 31-38.
- BARBOSA, O. 1937. **Geologia do município de Araxá, Minas Gerais**. *Min. Metal.* 2(10):247-248.
- BARBOSA, O. 1955. **Guia das Excursões**. In: Congr. Bras. Geol, 9, 1955. São Paulo. SBG. Not.3
- BEAR, J. 1972. **Dynamics of fluids in porous media**. American Elsevier Publishing Company, New York, New York, 764 pages.
- BEAR J., MILOVAN S., RANDALL R. 1992. **Fundamentals of groundwater modeling**. EPA Groundwater Issue, US-EPA, Solid Waste and Energy Response, Report no. EPA/540/S-92/005.
- BEATO, D. A. C., VIANA, H. S., DAVIS, E. G. 2000. **Avaliação e Diagnóstico Hidrogeológico dos Aquíferos de Águas Minerais do Barreiro do Araxá, MG-Brasil**. *Águas Subterrâneas*. Anais – XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 26p.
- BERMAN, E. S., LEVIN, N. E., LANDAIS, A., LI, S., & OWANO, T. 2013. **Measurement of  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$ , and  $^{17}\text{O}$ -excess in water by off-axis integrated cavity output spectroscopy and isotope ratio mass spectrometry**. *Analytical chemistry*, 85(21), 10392-10398.
- BERTOLO, R., HIRATA, R., FERNANDES, A. 2007. **Hidrogeoquímica das águas minerais envasadas do Brasil**. Revista Brasileira de Geociências. 37(3): 515-529.

BIONDI, J. C. 2015. **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. 2ª edição revisada e atualizada. – São Paulo: Oficina de Textos.

BONOTTO, D. M. 2014.  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil. *Journal of environmental radioactivity*, v. 132, p. 21-30.

BOUWER, HERMAN, and RICE, R.C. 1976. **A slug test method for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells**: *Water Resources Research*, v. 12, no. 3, p. 423–428.

BROD, J.A., RIBEIRO, C.C., GASPAR, J.C., JUNQUEIRA-BROD, T.C., BARBOSA, E.S.R., RIFFEL, B.F., SILVA, J.F., CHABAN, N., FERRARI, A.J.D. 2004. **Geologia e mineralizações dos Complexos Alcalinos-Carbonatíticos da Província Ígnea do Alto Paranaíba**. Excursão nº 1, 43º CBGeol, Anais...Araxá, SBG.

CAMINHOÁ, J. M. (1890). **Estudo das Aguas Mineraes do Araxá**. *Comparadas às congêneres de outras*.

CLARK, I., FRITZ, P. 1997. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. Lewis Publisher, 311p.

CUNNINGHAM, W.L. SCHALK, C.W. 2011. **GWPD 17 - Conducting an instantaneous change in head (slug) test with a mechanical slug and submersible pressure transducer**. Groundwater technical procedures of the U.S. Geological Survey: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, pp. 145-151.

CUSTODIO, E. & LLAMAS, M. R. 1983. **Hidrologia Subterrânea**. Ed. Omega, 2ª ed. Barcelona.

DE CARVALHO FILHO, C.A; COTA, S. D. S. 2003. **Análise de sensibilidade para o parâmetro condutância na condição de contorno de tipo 3 do modelo ModFlow**. *Águas Subterrâneas*, v. 17.

DEHO. 2014. **Reavaliação de Recursos Remanescentes do Complexo Poli-Mineral CBMM/CODEMIG, Araxá – MG**. Relatório Técnico Interno: 231p.

DEHO. 2015. **Relatório Técnico para Solicitação de Outorga para Pesquisa Hidrogeológica**. Relatório técnico interno. CBMM. 41p.

FEITOSA, F. A. C. ; MANOEL FILHO, J. ; FEITOSA, E. C. ; DMETRIO, J. G. A. 2008. **Hidrogeologia: Conceitos e aplicações**. 3a Edição Revisada e Ampliada. CPRM Serviço Geológico Nacional, 2. P. 77 – 91.

FERREIRA, I. L. 2005. **Estudos geomorfológicos em áreas amostrais da Bacia do Rio Araguari-MG. Uma abordagem da cartografia geomorfológica**. Dissertação (Mestrado em Geografia)–Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

FETTER, C. W. (2001). *Applied hydrogeology* (Vol. 3, No. 3). Upper Saddle River: Prentice hall.

FERRIS, J.G., KNOWLES, D.B. 1963. **The slug-injection test for estimating the coefficient of transmissibility of an aquifer**, in Bentall, Ray, comp., Methods of determining permeability, transmissibility, and drawdown: U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1536-I, p. 299–304.

GIBSON S.A., THOMPSON R.N., LEONARDOS O.H., DICKIN A.P., MITCHELL J.G., 1995b. **The Late Cretaceous impact of the Trindade mantle plume - evidence from large volume, mafic, potassic magmatism in SE Brazil**. *J. Petrol.* p189-229.

GOLDER ASSOCIATES. 2013. **Estudos geológico-geotecnicos – Barragem B-8**. Relatório Técnico Interno. 193p.

GOMES, T.A.T. PEREIRA, S. Y. (2016). **Determinação da Condutividade Hidráulica do Minério de Nióbio, Associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro – Araxá – MG, Utilizando Ensaio Com Permeâmetro de Guelph e Testes de Slug**. Inédito.

GOURLEY, H. J. F., CRIMP, B. S. 1915. **The flow of water over sharp-edged notches and weirs**. (including appendix). In *Minutes of the Proceedings of the Institution of Civil Engineers* (Vol. 200, No. 1915, pp. 388-408). Thomas Telford-ICE Virtual Library.

GUIMARÃES, D. 1925. **Estudo de algumas rochas relacionadas com as fontes minerais de Araxá e outras**. Ministério da Indústria e Commercio - Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil. Bol. no.9 - Contribuições a Geologia Econômica. Rio de Janeiro. p. 79-98.

GUIMARÃES, D. 1957. **Relatório sobre a jazida de pirocloro do Barreiro, Araxá, Minas Gerais**. DNPM/DFPM- Boletim no. 103. Belo Horizonte. 87 p.

GUPTA, S. K. POLACH, H. A., 1985. **Radiocarbon Dating Practices at ANU. Handbook**, Radiocarbon Laboratory, Research School of Pacific Studies, ANU, Canberra.

HANNA T. M., AZRAG E. A., ATKINSON L.C. 1994. **Use of an analytical solution for preliminary estimates of groundwater inflow to a pit**. *Mining Eng.* 46(2): 149-152.

HASUI, Y., CORDANI, U. G. 1968. **Idades potássio-argônio de rochas eruptivas mesozóicas do oeste mineiro e sul de Goiás**. In: 22º Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte. Anais.p. 139-143.

HASUI, Y., SADOWSKI, G. R., SUGUIU, K., FUCK, G. F. 1975. **The phanerozoic tectonic evolution of the western Minas Gerais State**. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 47, p. 431-438.

HEALY, R. W.; COOK, P. G. 2002. **Using groundwater levels to estimate recharge**. *Hydrogeology Journal* 10, 91–109.

HVORSLEV, M. J. **Time lag and soil permeability in ground water observations**: Vicksburg, Miss U S Army Corps of Engineers Waterwaus Experiment Station, Bulletin.1951. p 36 - 50

ISSA FILHO, A., LIMA, P. S., & SOUZA, O. M. 1984. **Aspectos da Geologia do Complexo Carbonatítico do Barreiro, Araxá, MG, Brasil.** In: Rodrigues, C. S., Lima, P. S. (eds.) *Complexos Carbonatíticos do Brasil: Geologia*. São Paulo, CBMM, p. 20-44.

ISSA FILHO, A., RIFFEL, B. F., & DE FARIA SOUSA, C. A. 2001. **Some aspects of the mineralogy of CBMM Niobium deposit and mining and pyrochlore ore processing – Araxá, MG – Brazil.** In *Niobium Science & Technology: Proceedings of the International Symposium Niobium*.

LINSLEY, R. K., & FRANZINI, J. B. 1978. Engenharia de recursos hídricos. In *Engenharia de recursos hídricos*. USP/McGraw-Hill.

LIS, G., WASSENAAR, L. I., & HENDRY, M. J. 2008. **High-precision laser spectroscopy D/H and 18O/16O measurements of microliter natural water samples.** *Analytical Chemistry*, 80(1), 287-293.

LUGEON, M. (1933). **Barrage et géologie**. Paris: Dunderod

MANCINI, L. H. 2002. **Migração de <sup>226</sup>Ra e <sup>228</sup>Ra nas águas superficiais e subterrâneas no Complexo Alcalino do Barreiro, Araxá (MG).** Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 168p.

MANCINI, L. H., BONOTO, D. M. 2012. **Migração de Rádio nas águas superficiais e subterrâneas do Morro do Ferro e Complexo Alcalino do Barreiro, Minas Gerais, Brasil.** *Geochimica Brasiliensis* 20.3.

McDONALD, M. G., & HARBAUGH, A. W. 1988. **A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model.** U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chapter A1.

MORAES, L. C., SEER, H. J., BENTO, J. H. B., LEAL, C. F., MADEIRA, M. R. 2008. **Análises geométrica do alojamento de magmas no entorno do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro, Araxá, Minas Gerais, por meio da atitude espacial de fraturas e diques.** In: IV Simpósio de vulcanismo e ambientes associados, Foz do Iguaçu, PR. Anais. CD-Rom.

MORTON, K. L.; MEKERK, F. A. 1993. **A Phased Approach to Mine Dewatering.** *Mine Water Env.*, v. 12, n. 1-4, p. 27-33.

MOURÃO, M. A. A. 2007. **Caracterização Hidrogeológica do Aquífero Cauê, Quadrilátero Ferrífero, MG.** [manuscrito]. 297 f., enc. : il. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

MWH. 2011. Informe Hidrogeológico de Campo de la Presa de Relaves B-8. Relatório técnico interno. 31p.

OLIVA, A., KIANG, C. H., CAETANO-CHANG, M. R. 2005. **Determinação da condutividade hidráulica da Formação Rio Claro: análise comparativa através de análise granulométrica e ensaios com permeâmetro guelph e testes de slug.** *Águas subterrâneas*, 19(2).

PACKARD. 1986. **Tri Carb Liquid Scintillation Analyzer Model 1500 Operation Manual**. Rev. A, Publication No. 169-3059, Packard *Instrument Company*, Inc.

PARKHURST, D. L., & APPELO, C. A. J. 1999. **User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations**. USGS. Water Resour. Inv. Rep. 99-4259, 312p.

PENNA, D., STENNI, B., ŠANDA, M., WREDE, S., BOGAARD, T. A., MICHELINI, M., ... & BONAZZA, M. 2012. **Technical Note: Evaluation of between-sample memory effects in the analysis of  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  of water samples measured by laser spectrometers**. Hydrology and Earth System Sciences, 16(10), 3925-3933.

RAPOSO, D.B. 2011. **Caracterização do aquífero associado ao Complexo Alcalino Carbonatítico do Barreiro, oeste de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas. 107p.

REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E. 1983. **A Reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water table**. *Soil Science*, 136(4), 250.

REYNOLDS, W. D., & ELRICK, D. E. 1985. **In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the  $[\alpha]$ -parameter using the Guelph Permeameter**. *Soil Science*, 140(4), 292-302.

RICHARDS, L. A. 1931. **Capillary conduction of liquids through porous mediums**. *Journal of Applied Physics*, 1(5), 318-333.

ROCHA, M. B. B., SEER, H. J. 2008. **Mapeamento e caracterização do meio físico de Araxá-MG, utilizando técnicas de geoprocessamento**. Educação & Tecnologia, 13(1).

RODRIGUES, G., MANTOVANI, M., RUGENSKY, A., SHUKOWSKY, W. 2006. **Modelagem Gravimétrica do Complexo Alcalino de Araxá**. Simpósio Brasileiro de Geofísica, 2º, Natal, SBGf, Anais...p 1-5. 2006.

SAD, G.J.H., TORRES, N. 1976. **Geology and mineral resources of the Barreiro Complex, Araxá, Brazil**. In: Simpósio Internacional de Carbonatitos. Poços de Caldas, Brasil.

SANTOS, A. G. 2004. **Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

SANTOS, R. V., CLAYTON, R. N. 1995. **Variation of oxygen and carbon isotopes in carbonatites: A study of Alkaline Complexes**. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 59. No7; 1339-1352.

SCANLON, B. R., HEALY, R. W. COOK, P. G. 2002. **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge**. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 18-39.

SEER, H. J. 1999. **Evolução tectônica dos grupos Araxá, Ibiá e Canastra na Sinforma de Araxá, Minas Gerais.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. 267 p.

SEER, H.J., MORAES, L.C., SILVA, C. H. 2014. **Projeto fronteiras de Minas Gerais. Mapeamento da folha Araxá.** UFMG. Belo Horizonte.

SILVA, A.B., 1986. **Jazida de nióbio de Araxá, Minas Gerais.** In C. Schobbenhaus (Ed.), Brasília, MME/DNPM, \_\_\_456-462.

SILVA, C.H. 2003. **Evolução Geológica da Faixa Brasília na Região de Tapira Sudoeste de Minas Gerais.** Tese (Doutorado)– Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, São Paulo.

SILVA, C. H., SIMÕES, L. S. A., DAMÁSIO, W. L., FERREIRA, S. M., LUVIZOTTO, G. L. 2004. **Geologia do Grupo Canastra em sua localidade-tipo e implicações na tectonoestratigrafia do segmento setentrional da Faixa Brasília.** In: Congresso Brasileiro de Geologia, 12. , 2004. Araxá. Anais ... Araxá: SBG. p255.

SILVA, C.H, SIMÕES, L.S.A., KRYMSKY, R., MACAMBIRA, M.J. 2006. **Proveniência e Idade do Metamorfismo das Rochas da Faixa Brasília, na Região de Tapira (SW de Minas Gerais),** Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, 6(1):53-66.

SILVA, C. H. D. SIMÕES, L. S. A., DAMÁZIO, W. L., FERREIRA, S. N., LUVIZOTTO, G. L. 2012. **O Grupo Canastra em sua área tipo, região de Tapira, sudoeste do estado de Minas Gerais.** Geol. USP, Série Científica, 2012, 12(2):83-98.

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. **Guelph Permeameter: Operating – Instructions,** Soilmoisture manual, Rev.8. 25p.

SOTO, M. A. 1999. **Estudo da Condutividade Hidráulica em Solos Não Saturados.** Tese de mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade São Carlos, São Carlos, SP, 118 p.

SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. 2009. **Análise do método do Permeâmetro de Guelph na determinação da condutividade hidráulica saturada.** Águas Subterrâneas (23)01: 137-152

STENSTRÖM, K. E., SKOG, G., GEORGIADOU, E., GENBERG, J., JOHANSSON, A. 2011. **A guide to radiocarbon units and calculations.** Lund University, Lund, Sweden.

TAYLOR, C. B., 1977. **Tritium enrichment of environmental waters by electrolysis: development of cathodes exhibiting high isotopic separation and precise measurement of tritium enrichment factors.** *Proceedings of the International Conference of Low-Radioactivity Measurements and Applications, Slovenski Pedagogicke Nakladatelstvo, Bratislava:* 131-40

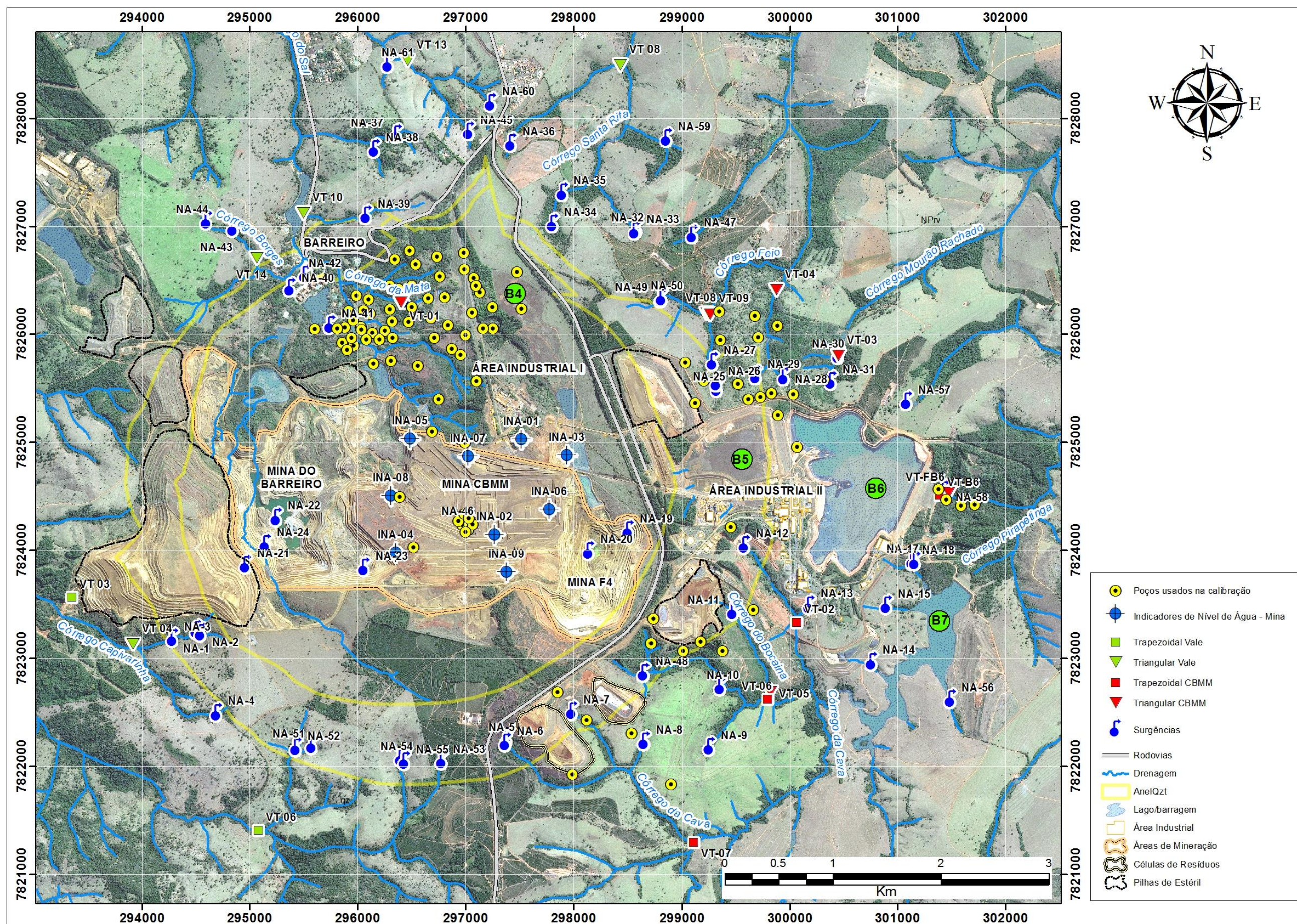
THORNTHWAITE, C. W., MATHER, J. R. 1955. **The water budget and its use in irrigation.** Yearbook of Agriculture, Washington, p. 346-358.

TORRES, M. C., GASPAR, J. C. 1995. **Geoquímica do manto de intemperismo da mina de fosfato do Complexo Alcalino-Carbonatítico do Barreiro, Araxá-MG.** In: 5º Congresso Brasileiro de Geoquímica e III Congresso de Geoquímica dos países de língua portuguesa. Niterói, RJ. Resumos expandidos.

VIANA, H. S., DAVIS, E. G., BEATO, D. C., CABRAL, J. L. 1998. **Projeto Araxá/Barreiro: Estudo Geoambiental do Barreiro.** Belo Horizonte. COMIG/CPRM. 118 p.

WATERLOO HYDROGEOLOGIC. 2000. *Visual MODFLOW, User's Manual, v. 2.8.2.* Waterloo, Ontario, Canada, 666p.

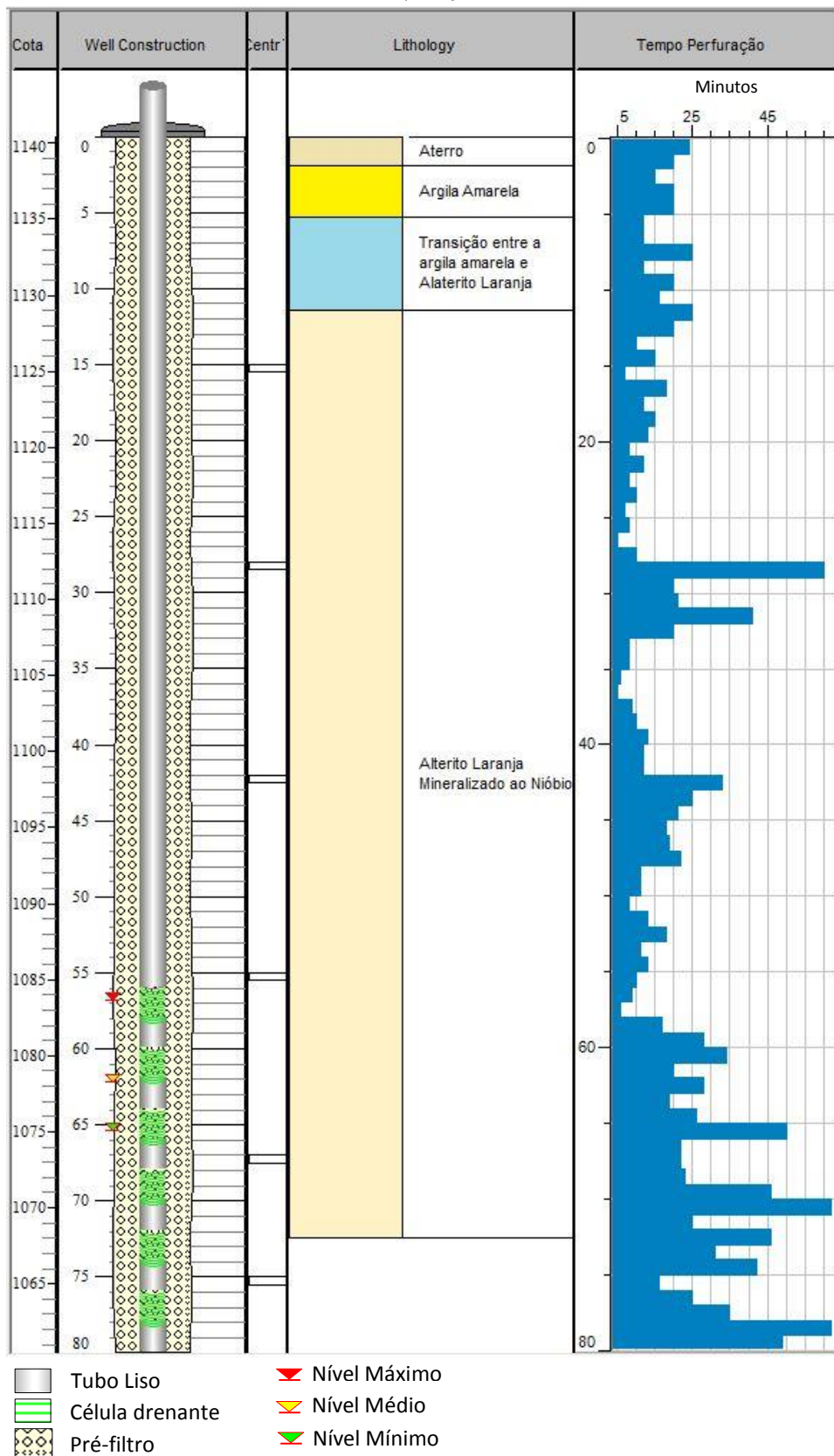




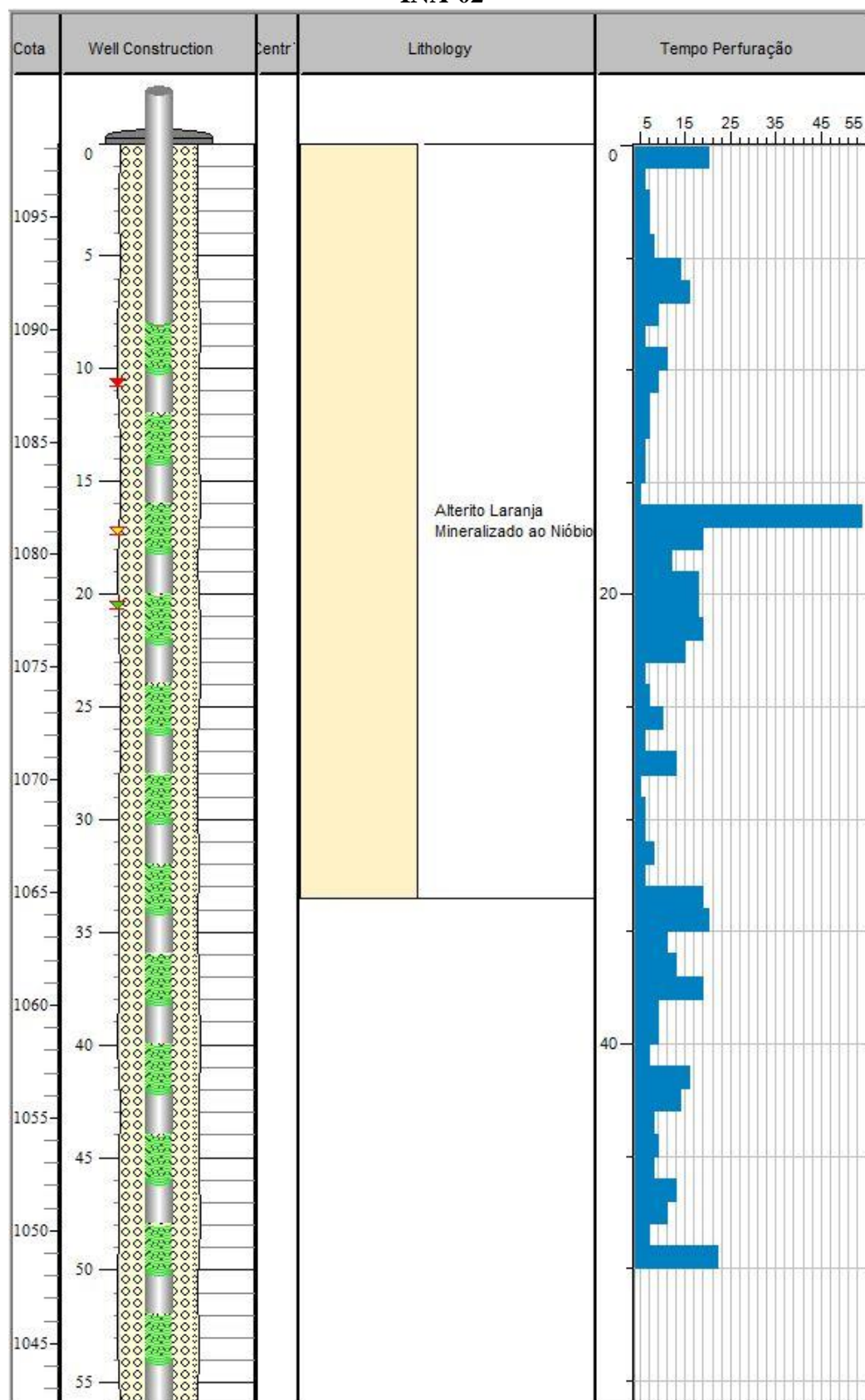


## APÊNDICE B – PERFIS CONSTRUTIVOS DOS INDICADORES DE NÍVEL DE ÁGUA

INA -01



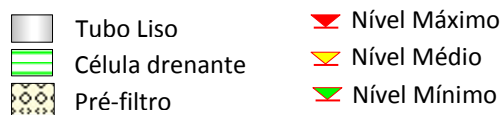
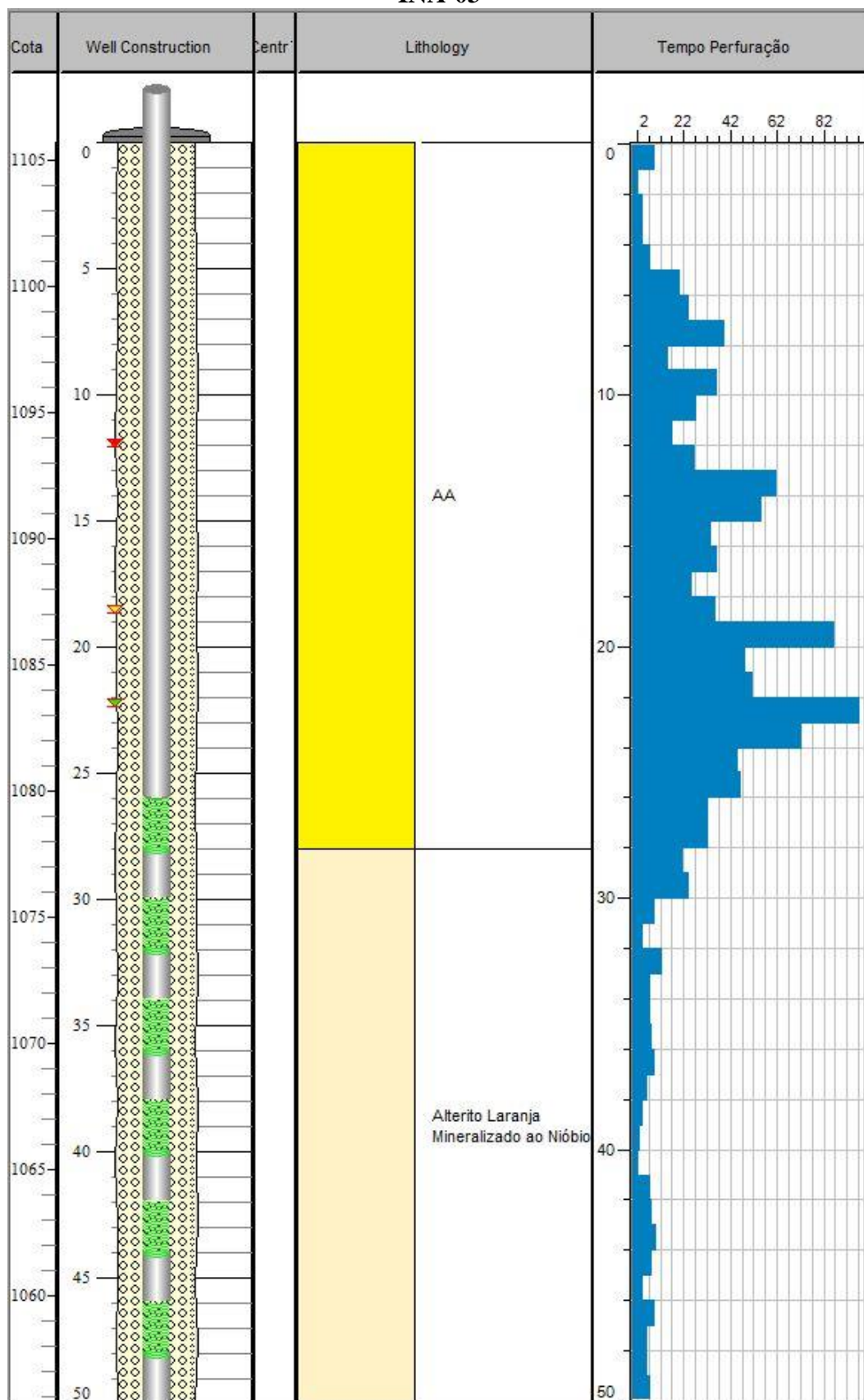
## INA-02



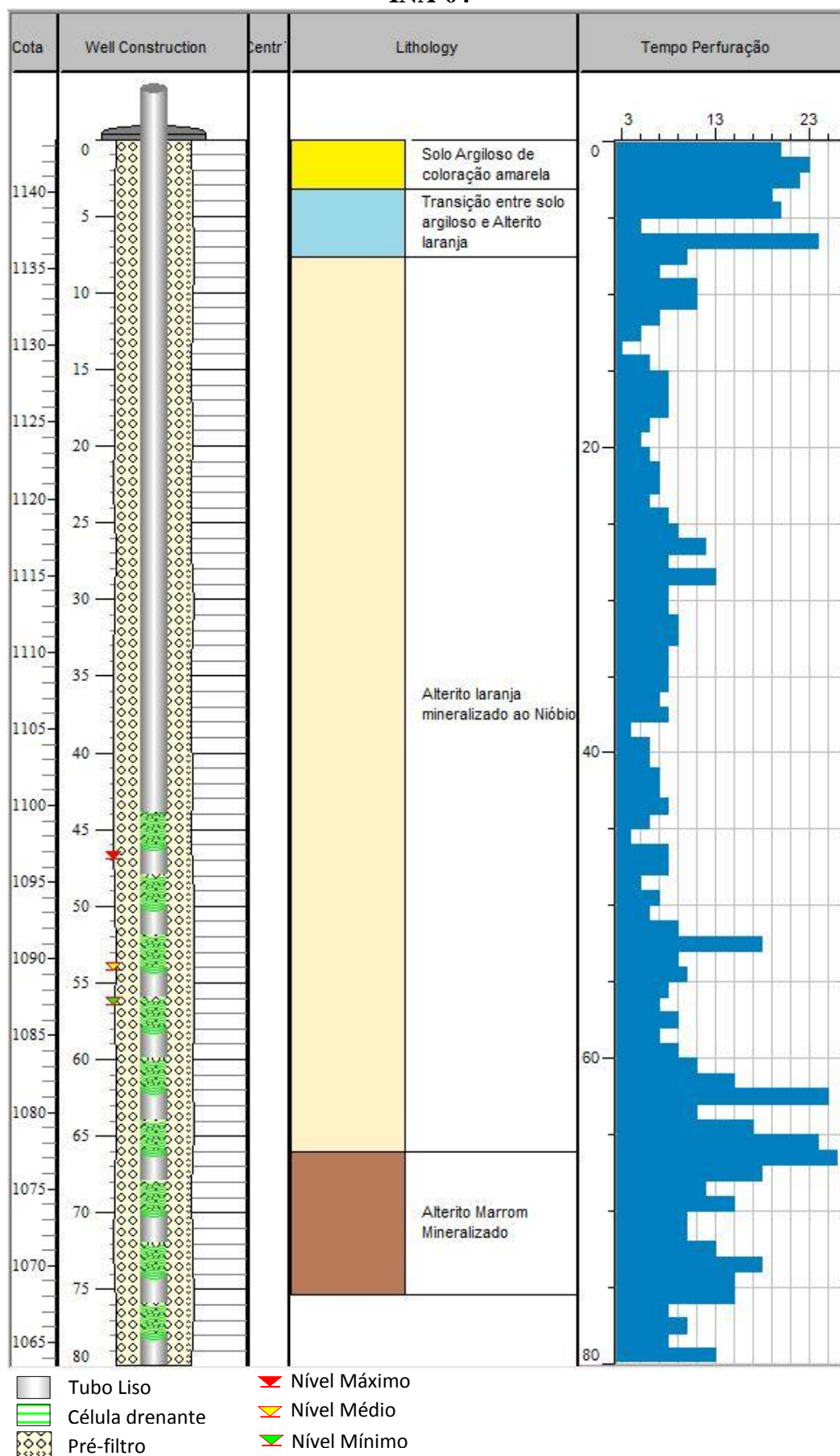
Tubo Liso  
 Célula drenante  
 Pré-filtro

Nível Máximo  
 Nível Médio  
 Nível Mínimo

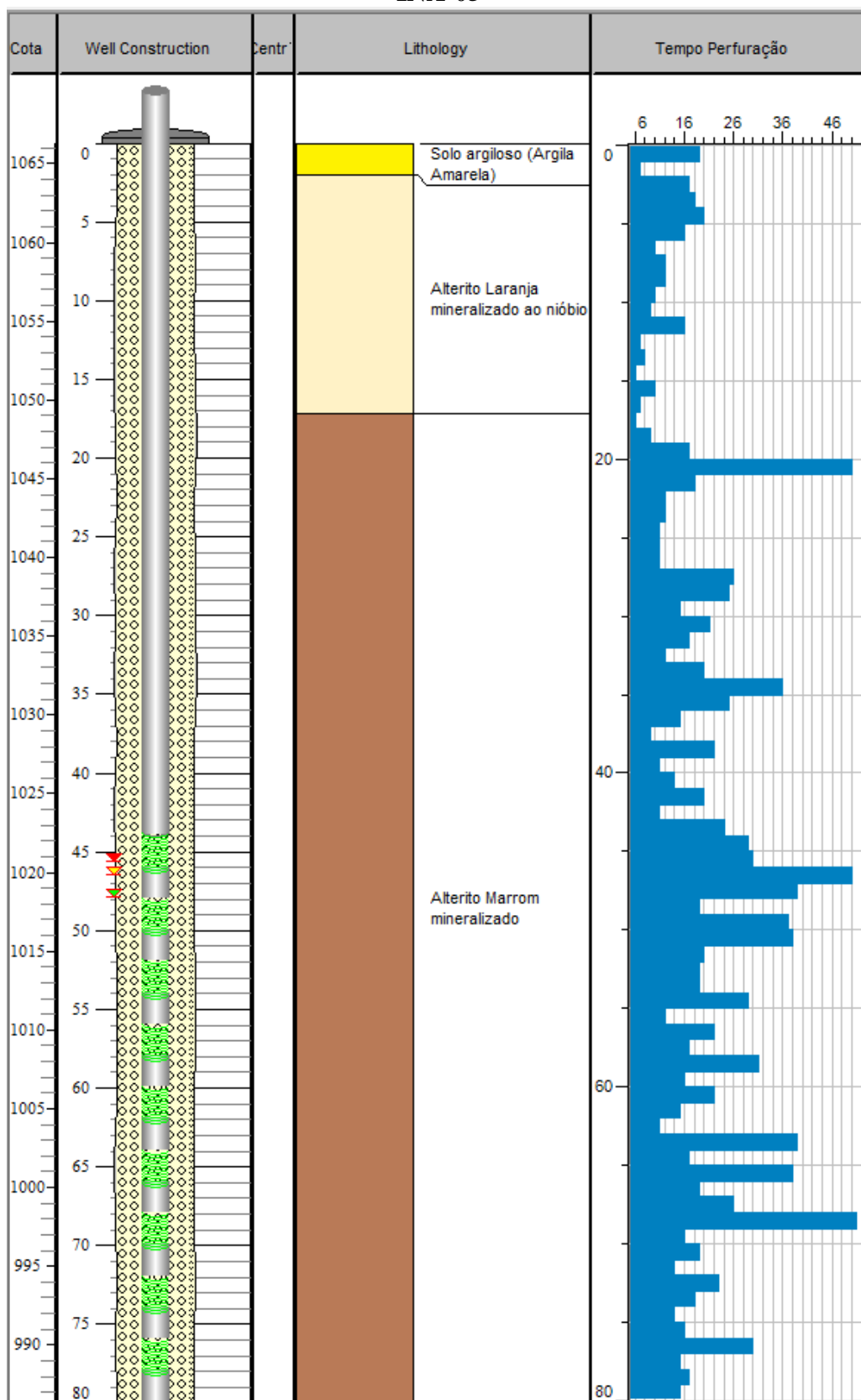
## INA-03









## INA-04



## INA-05

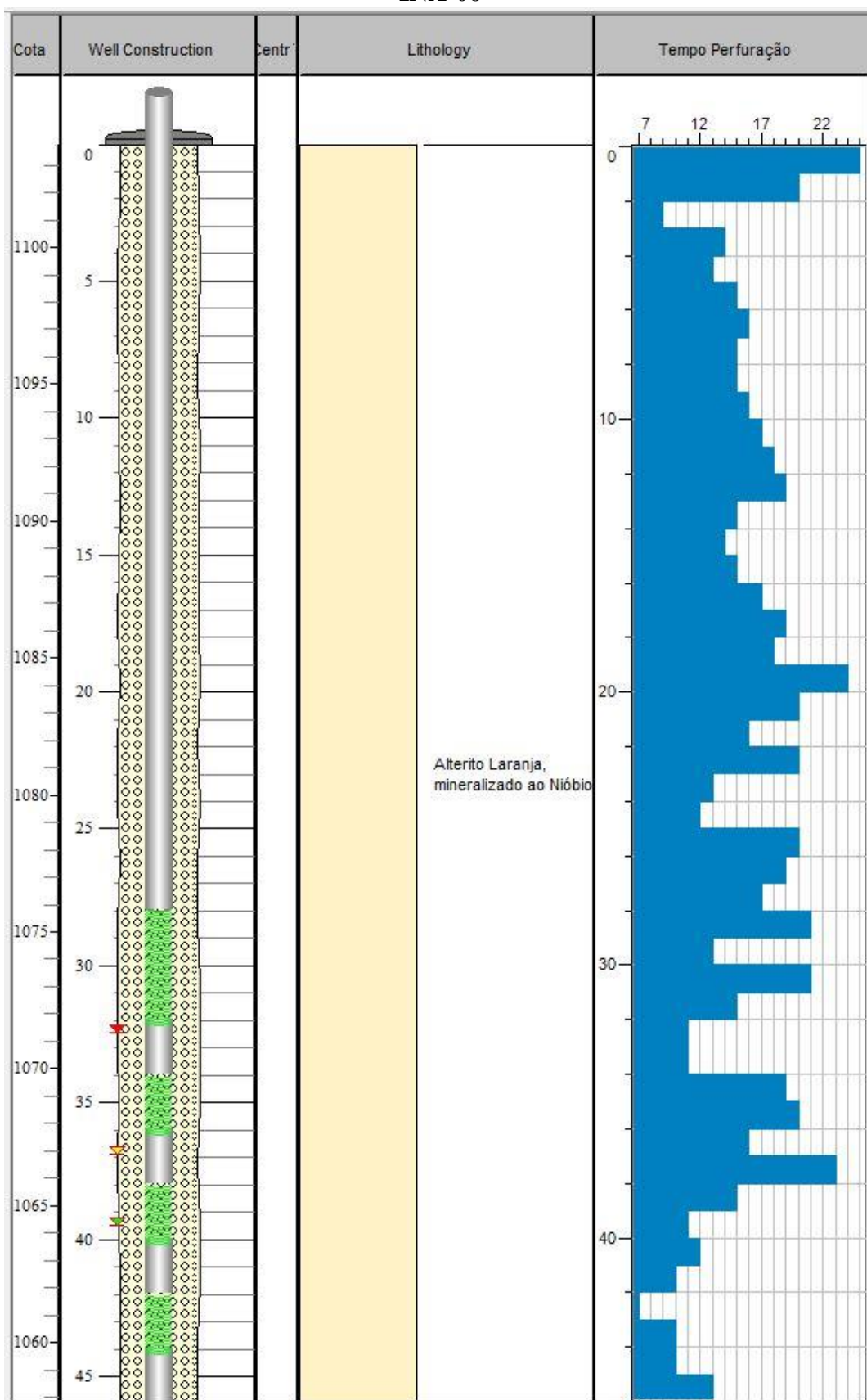


 Tubo Liso  
 Célula drenante  
 Pré-filtro

 Nível Máximo  
 Nível Médio  
 Nível Mínimo



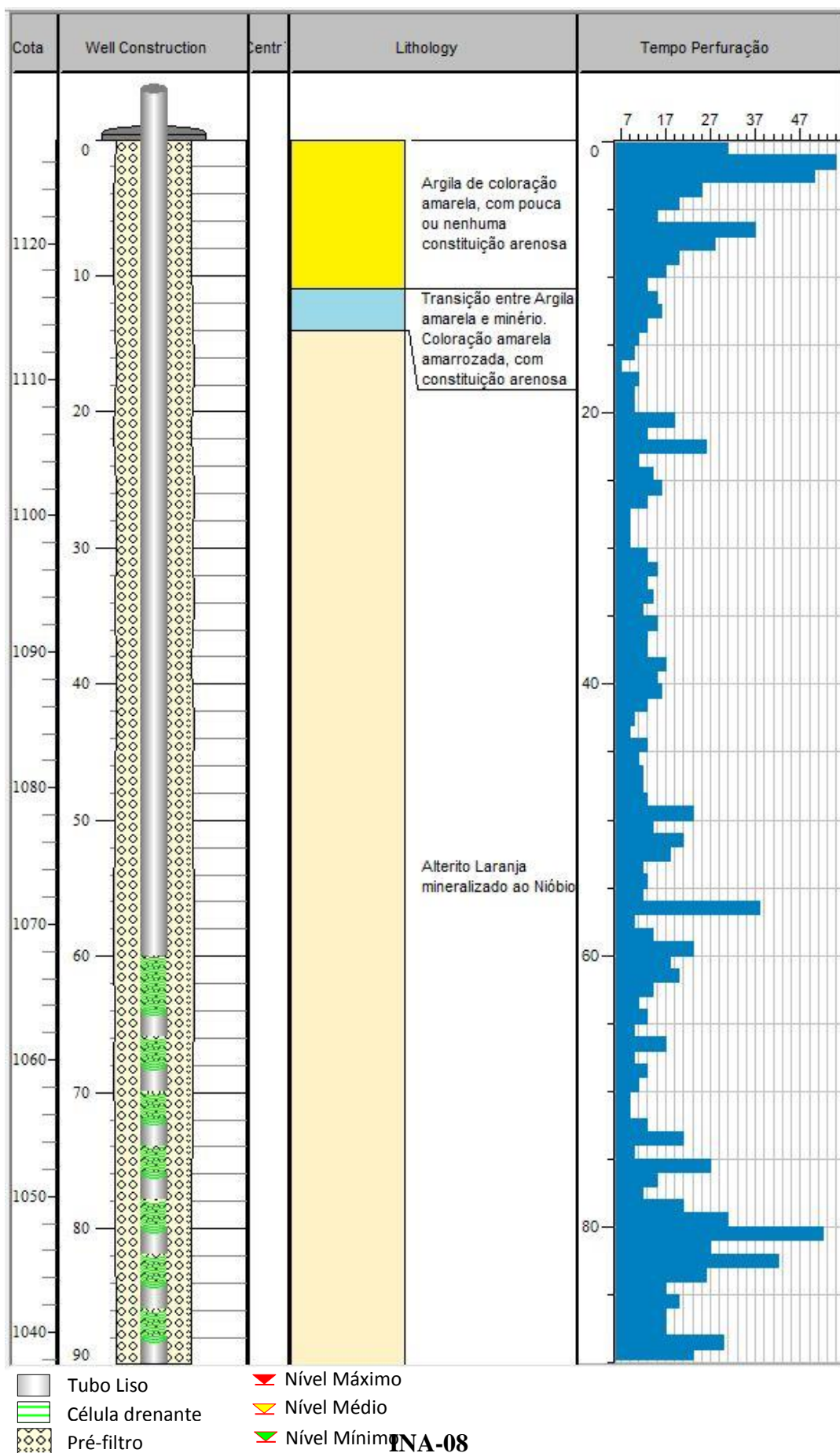
## INA-06

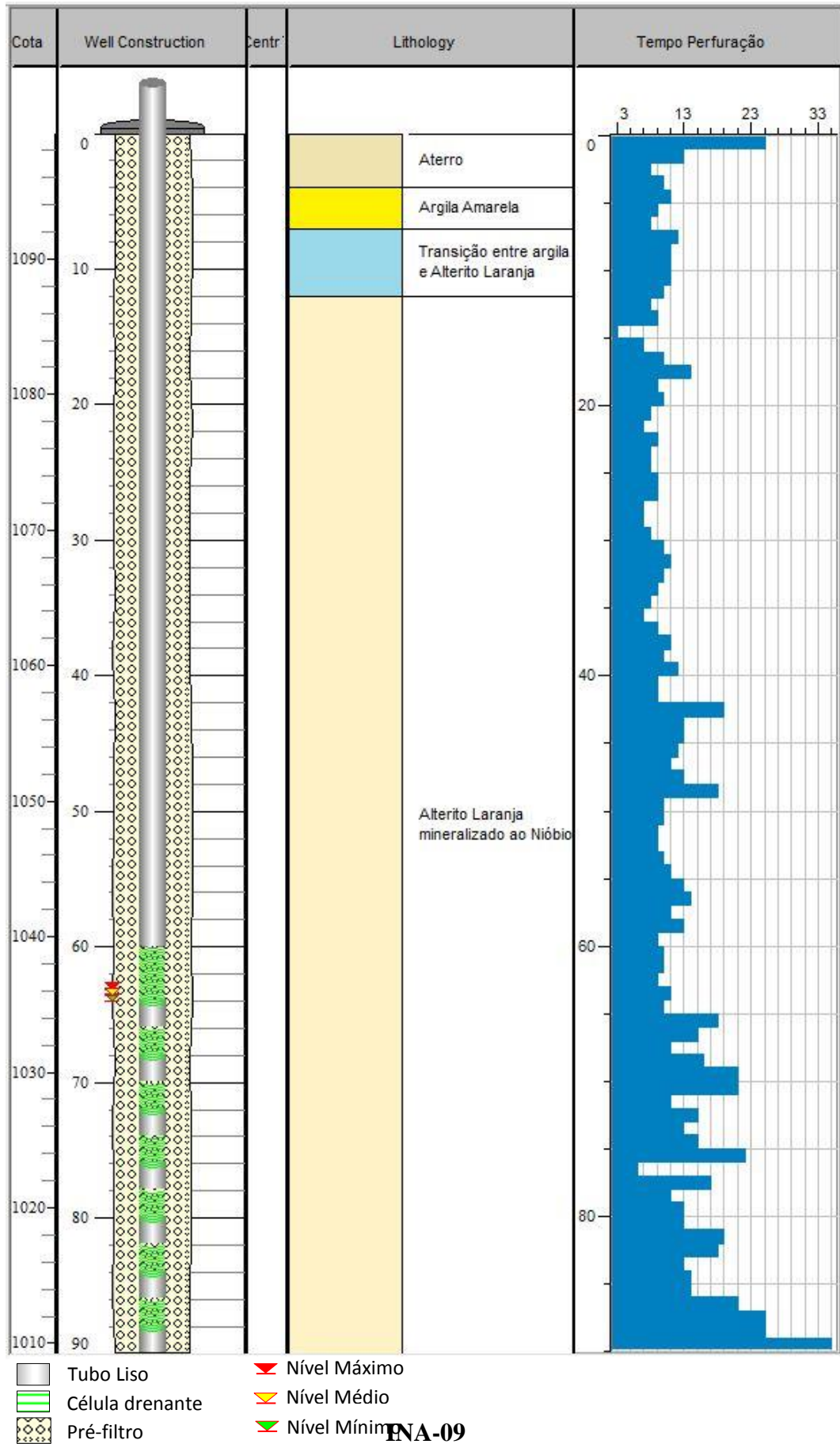


Tubo Liso  
 Célula drenante  
 Pré-filtro

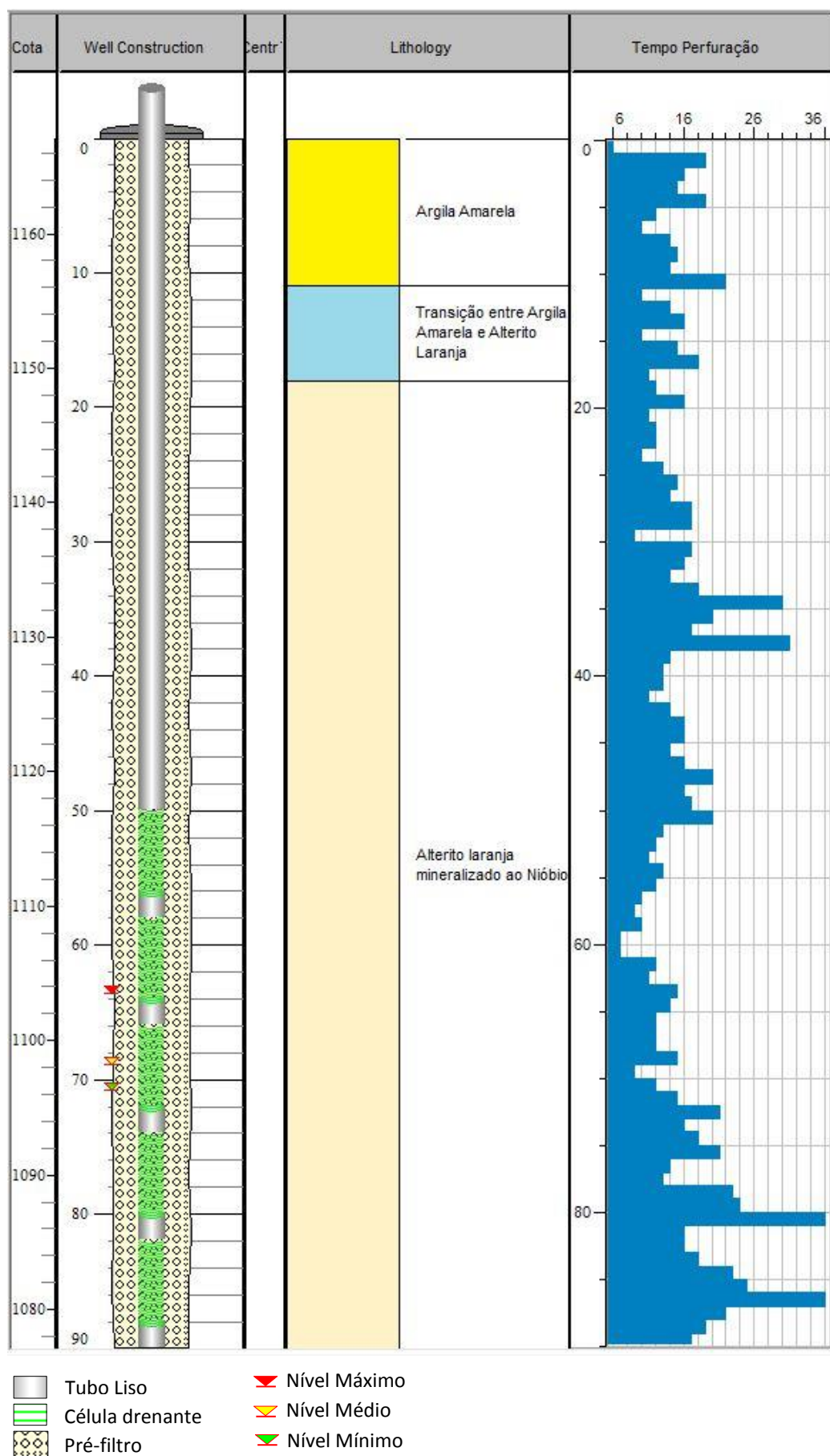
Nível Máximo  
 Nível Médio  
 Nível Mínimo

## INA-07









## APÊNDICE C – Resultados hidroquímicos

Espécies Analisadas Resultados em (mg/L)		Cálcio	Magnésio	Sódio	Potássio	Cloreto	CaCO3	HCO3	NH3	Nitrato	Nitrito	Sulfato	Fluoreto
ÁGUA SUBTERRÂNEA	LQP *	0.01	0.005	0.001	0.001	1	0	5	0.1	0.5	0.02	5	0.5
	VMP *	---	---	200	---	250	---	---	---	10	1	250	1.5
	INA-03	2.84	0.772	0.5	0.447	2.96	0	12.3	0.376	< 0.5	< 0.02	< 5	0.565
	INA-04	7.59	3.95	0.993	1.42	< 1	0	24.8	< 0.1	1.26	0.107	10.8	0.449
	INA-05	7.32	0.789	0.382	0.146	9.13	0	10.4	< 0.1	1.5	< 0.02	< 5	1.29
	INA-08	3.94	0.753	3.8	0.324	< 1	0	7.88	< 0.1	0.7	0.031	13.5	1.01
	PP-11	17.9	6.54	0.65	1.76	1.5	0	70	< 0.1	< 0.5	< 0.02	10.7	0.9
ÁGUA DE SURGÊNCIAS	LQP **	0.001	0.001	0.001	0.001	1	0	5	0.1	0.5	0.02	5	0.001
	VMP **	---	---	---	---	250	---	---	---	10	1	250	1.4
	NA-1	2.28	1.91	0.603	1.13	< 1	0	26.3	< 0.1	< 0.5	< 0.02	< 5	0.36
	NA-4	4.5	3.2	1.4	3.71	2.4	0	26	< 0.1	< 0.5	< 0.02	9.59	0.29
	NA-6	5.2	1.83	0.414	0.966	1.3	0	21.6	< 0.1	< 0.5	< 0.02	< 5	0.21
	NA-7	5.8	2.2	0.932	1.32	1.6	0	25.9	0.203	0.5	< 0.02	< 5	0.15
	NA-10	6.56	5.91	1.6	3.98	1	0	46.1	< 0.1	0.53	< 0.02	15	0.64
	NA-13	3.07	2.36	1.24	2.3	1.1	0	24.9	< 0.1	0.72	< 0.02	17.6	0.26
	NA-14	1.84	2.42	1.18	1.75	< 1	0	16	0.106	1.76	< 0.02	15.1	0.16
	NA-15	3.09	3.13	1.2	2.18	1.2	0	23.9	< 0.1	0.97	< 0.02	< 5	0.14
	NA-31	5.39	4.02	1.7	2.56	1.1	0	35.3	< 0.1	< 0.5	< 0.02	11.8	0.25
	NA-32	9.16	3.24	0.614	1.03	< 1	0	41.2	< 0.1	< 0.5	< 0.02	10.8	0.24
	NA-34	11.4	4.77	0.58	3.53	1	0	55.1	< 0.1	< 0.5	< 0.02	12.8	0.25
	NA-36	4.51	3.07	1.56	3.81	1.1	0	29.7	< 0.1	< 0.5	< 0.02	15.9	0.32
	NA-38	9.35	6.81	2.54	5.04	2	0	53.5	< 0.1	< 0.5	< 0.02	18.3	0.87
	NA-39	15.6	8.69	1.02	3.54	< 1	0	69.1	< 0.1	< 0.5	< 0.02	12.4	0.64
	NA-40	23.9	8.83	1.45	2.2	2	0	85.2	< 0.1	0.6	< 0.02	11	0.51
	NA-41	21	9.21	1.28	2.56	3.8	0	76	< 0.1	< 0.5	< 0.02	9.73	0.48
	NA-43	6.19	4.8	2.55	3.78	1.1	0	44.9	< 0.1	< 0.5	< 0.02	16.7	0.3
	NA-49	7.81	3.74	1.27	2.74	1.4	0	39.8	< 0.1	< 0.5	< 0.02	11.5	0.27
	NA-53	9.25	6.67	2.07	4.42	1.1	0	54.4	< 0.1	< 0.5	< 0.02	14.5	0.39

Espécies Analisadas Resultados em (mg/L)		Alumínio Diss.	Alumínio Tot.	Arsênio Diss.	Arsênio Tot.	Bário Tot.	Bário Diss.	Cobre Diss.	Cobre Tot.	Cobalto Diss.	Cobalto Tot.
ÁGUA SUBTERRÂNEA	LQP *	0.02	0.02	0.001	0.001	0.02	0.005	0.001	0.001	0.001	0.005
	VMP *	0.2	0.2	0.01	0.01	0.7	0.7	2	2	---	---
	INA-03	0.0175	0.0203	< 0.001	< 0.001	0.0875	0.0673	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	INA-04	0.418	1.4	< 0.001	0.00782	1.83	0.1096	< 0.001	0.00172	< 0.001	0.013
	INA-05	0.0129	0.0474	< 0.001	< 0.001	2.63	0.095	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	INA-08	0.00783	0.326	< 0.001	0.00187	5.5	1.37	0.00156	0.00478	< 0.001	0.00758
	PP-11	0.00993	0.0142	< 0.001	< 0.001	0.235	0.098	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
ÁGUA DE SURGÊNCIAS	LQP **	0.001	0.001	0.001	0.005	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	VMP **	0.1	---	---	0.01	0.7	---	0.009	---	---	0.05
	NA-1	0.0379	0.0689	< 0.001	< 0.001	0.112	0.105	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-4	0.0985	0.204	< 0.001	< 0.001	0.628	0.501	< 0.001	0.00238	< 0.001	< 0.001
	NA-6	0.1	0.101	< 0.001	< 0.001	0.0964	0.091	< 0.001	0.00491	< 0.001	< 0.001
	NA-7	0.0487	0.25	< 0.001	< 0.001	0.581	0.0839	< 0.001	0.00221	< 0.001	< 0.001
	NA-10	0.206	1.21	< 0.001	< 0.001	0.633	0.602	< 0.001	0.00204	0.00184	0.00311
	NA-13	0.21	1.7	.	< 0.001	0.375	0.355	0.0023	0.00654	0.00355	0.00763
	NA-14	0.0331	0.0539	< 0.001	< 0.001	0.0945	0.0934	< 0.001	0.00146	< 0.001	< 0.001
	NA-15	0.0314	0.0754	< 0.001	< 0.001	0.173	0.158	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-31	0.0328	0.0767	< 0.001	< 0.001	0.167	0.124	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-32	0.00827	0.0767	< 0.001	< 0.001	0.103	0.081	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-34	0.097	0.106	< 0.001	< 0.001	0.188	0.15	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00164
	NA-36	0.17	0.735	< 0.001	< 0.001	0.284	0.188	0.00142	0.00199	< 0.001	0.00157
	NA-38	0.261	2.63	< 0.001	0.00246	1.27	1	< 0.001	0.00821	0.00144	0.0058
	NA-39	0.028	0.0494	< 0.001	< 0.001	0.887	0.0605	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-40	0.00844	0.0306	< 0.001	< 0.001	1.21	0.997	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-41	0.00348	0.0108	< 0.001	< 0.001	1.71	1.62	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-43	0.00878	0.282	< 0.001	< 0.001	0.522	0.102	< 0.001	0.00151	< 0.001	0.00267
	NA-49	0.0439	0.0795	< 0.001	< 0.001	0.513	0.511	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
	NA-53	0.097	0.266	< 0.001	< 0.001	0.565	0.5	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

Espécies Analisadas Resultados em (mg/L)		Chumbo Diss.	Chumbo Tot.	Cádmio Diss.	Cádmio Tot.	Cromo Diss.	Cromo Tot.	Ferro Diss.	Ferro Tot.	Manganês Diss.
ÁGUA SUBTERRÂNEA	LQP *	0.001	0.005	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.02	0.005
	VMP *	0.01	0.01	0.005	0.005	0.05	0.05	0.3	0.3	0.1
	INA-03	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0637	0.114	0.117
	INA-04	< 0.001	0.0359	< 0.001	< 0.001	0.00826	0.014	0.0376	6.43	0.0055
	INA-05	< 0.001	0.00338	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0141	0.339	0.012
	INA-08	< 0.001	0.0236	< 0.001	< 0.001	0.00162	0.00373	0.0513	3.48	0.00735
	PP-11	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0036	0.00381	< 0.001	0.00465	0.00142
ÁGUA DE SURGÊNCIAS	LQP **	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.005	0.005	0.001	0.001
	VMP **	---	0.01	---	0.001	---	0.05	0.3	---	---
	NA-1	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.21	0.214	0.0324
	NA-4	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00204	0.288	0.604	0.0632
	NA-6	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00173	0.00221	0.288	0.336	0.0199
	NA-7	< 0.001	0.00153	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.221	0.38	0.2
	NA-10	0.00104	0.00233	< 0.001	< 0.001	0.00332	0.0101	0.467	1.95	0.0907
	NA-13	< 0.001	0.00924	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0153	0.92	4.91	0.195
	NA-14	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0224	0.0399	0.0045
	NA-15	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.001	0.0013	0.144	0.206	0.0595
	NA-31	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.288	0.396	0.0372
	NA-32	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0912	0.131	0.117
	NA-34	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.958	0.965	0.354
	NA-36	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00602	1.82	3.46	0.131
	NA-38	< 0.001	0.00822	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0124	0.288	5.4	0.194
	NA-39	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00157	0.111	0.174	0.0643
	NA-40	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00104	0.00177	0.234	0.349	0.0291
	NA-41	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00328	0.00334	0.0241	0.0437	< 0.001
	NA-43	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00127	0.0143	3.78	0.0011
	NA-49	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.0651	0.159	0.00823
	NA-53	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.581	0.728	0.22

Espécies Analisadas Resultados em (mg/L)		Manganês Tot.	Mercurio Diss.	Mercurio Tot.	Níquel Diss.	Níquel Tot.	Zinco Diss.	Zinco Tot.	Sulfeto	Urânio Diss.
ÁGUA SUBTERRÂNEA	LQP *	0.02	0.0001	0.0001	0.001	0.005	0.005	0.01	0.05	0.001
	VMP *	0.1	0.001	0.001	0.02	0.02	5	5	---	0.015
	INA-03	0.136	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.0035	0.00541	< 0.05	< 0.001
	INA-04	1.2	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	0.0199	1.38	1.4	< 0.05	< 0.001
	INA-05	0.0787	< 0.0001	< 0.0001	0.00329	0.00439	0.0129	0.0259	< 0.05	< 0.001
	INA-08	0.776	< 0.0001	< 0.0001	0.00374	0.0075	1.93	2.66	< 0.05	< 0.001
	PP-11	0.00149	< 0.0001	< 0.0001	0.00319	0.00325	0.00685	0.01	< 0.05	< 0.001
ÁGUA DE SURGÊNCIAS	LQP **	0.001	0.0001	0.0001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.05	0.001
	VMP **	0.1	---	0.0002	---	0.025	---	0.18	---	---
	NA-1	0.0333	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00435	0.00894	< 0.05	< 0.001
	NA-4	0.0788	< 0.0001	< 0.0001	0.00133	0.00284	0.0566	1.12	< 0.05	< 0.001
	NA-6	0.021	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	0.00216	0.00726	0.0245	< 0.05	< 0.001
	NA-7	0.224	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00883	0.0289	< 0.05	< 0.001
	NA-10	0.152	< 0.0001	< 0.0001	0.002	0.00861	0.0103	0.0164	< 0.05	< 0.001
	NA-13	0.299	< 0.0001	< 0.0001	0.0125	0.0163	0.0214	0.0359	< 0.05	< 0.001
	NA-14	0.00553	< 0.0001	< 0.0001	0.00681	0.00738	0.0148	0.031	< 0.05	< 0.001
	NA-15	0.0641	< 0.0001	< 0.0001	0.00395	0.00418	0.0115	0.0133	< 0.05	< 0.001
	NA-31	0.0399	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00326	0.00505	< 0.05	< 0.001
	NA-32	0.125	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00229	0.00429	< 0.05	< 0.001
	NA-34	0.387	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00278	0.00769	< 0.05	< 0.001
	NA-36	0.132	< 0.0001	< 0.0001	0.00296	0.00545	0.00579	0.0133	< 0.05	< 0.001
	NA-38	0.431	< 0.0001	< 0.0001	0.00307	0.0179	0.00816	0.144	< 0.05	< 0.001
	NA-39	0.0738	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00767	0.0116	< 0.05	< 0.001
	NA-40	0.037	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00313	0.016	< 0.05	< 0.001
	NA-41	0.00112	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00217	0.0044	< 0.05	< 0.001
	NA-43	0.403	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00695	< 0.05	< 0.001
	NA-49	0.0319	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	0.00116	0.0187	< 0.05	< 0.001
	NA-53	0.245	< 0.0001	< 0.0001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.00126	< 0.05	< 0.001

Espécies Analisadas Resultados em (mg/L)		Urânio Tot.	Prata Diss.	Prata Tot.	Selênio Diss.	Selênio Tot.	Temp.	Temp. do Ar	OD	Turbidez	C.E	Eh
ÁGUA SUBTERRÂNEA	LQP *	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	---	---	0.1	0.12	1	---
	VMP *	0.015	0.1	0.1	0.01	0.01	---	---	---	---	---	---
	INA-03	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	22.8	29	1.4	1.99	17.2	157.9
	INA-04	0.00379	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	24.5	35	3.1	159	62	198
	INA-05	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21.6	21	0.1	40.8	45.8	-10.8
	INA-08	0.00198	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	22.3	20	5.2	33.5	20	216.7
	PP-11	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21	33	8.5	< 0.1	148	119.6
ÁGUA DE SURGÊNCIAS	LQP **	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	---	---	0.1	0.1	1	---
	VMP **	0.02	---	0.01	---	0.01	---	---	> 5	100	---	---
	NA-1	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	19.3	33	6.4	0.92	43.4	108.4
	NA-4	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21.9	32	6.3	2.01	61.1	104.9
	NA-6	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	18.2	30	6.2	2.95	39.9	144.6
	NA-7	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21.3	30	6.4	2.21	58.3	57.9
	NA-10	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	16.8	34	8.5	21.6	74.8	126.1
	NA-13	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	19.1	29	5	11.2	50.3	82.9
	NA-14	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21.6	38	5.7	10.4	42.3	125.6
	NA-15	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	22.1	36	5.2	1.35	62.2	101.3
	NA-31	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	17.2	34	8.1	0.45	65.2	49.4
	NA-32	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	20.5	31	7	0.52	109	104.4
	NA-34	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	16.5	30	3.8	7.39	101	-3.9
	NA-36	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	18.3	32	6.2	7.33	66	102.9
	NA-38	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	19.5	35	7	65.8	104	-46.1
	NA-39	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	20.7	34	6.9	0.46	132	115.1
	NA-40	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21	32	2.8	1.09	163	92
	NA-41	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21.4	33	4.2	< 0.1	155	117.4
	NA-43	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	17.5	32	8.3	10.2	86.4	-60.1
	NA-49	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	21	30	7.2	1.89	81.1	104.4
	NA-53	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	18.7	30	6.8	7.43	106	112.6

Espécies Analisadas Resultados em (mg/L)		pH (a 25°C)	Cor	Sílica	Dureza Calculada	Fosfato	SDT
ÁGUA SUBTERRÂNEA	LQP *	0 a 14	5	0.001	0.01	0.01	1
	VMP *	---	---	---	---	---	---
	INA-03	5.22	< 5	4.4	10.3	0.02	11
	INA-04	6.66	< 5	24.7	39	0.43	30
	INA-05	6.27	< 5	5.74	21.5	1.4	29.3
	INA-08	5.65	1.4	4.88	10	0.79	10
	PP-11	6.76	< 5	16.2	71.6	0.68	94.7
ÁGUA DE SURGÊNCIAS	LQP **	0 a 14	5	0.001	0.01	0.01	1
	VMP **	6 a 9	75	---	---	---	---
	NA-1	6.89	< 5	13.4	13.6	0.06	27.8
	NA-4	6.85	< 5	25.8	24.4	0.03	39.1
	NA-6	5.92	8.28	20.5	12.1	0.1	25.5
	NA-7	6.17	11.1	6.57	23.5	0.03	37.3
	NA-10	6.5	13.9	27.1	40.7	0.12	47.9
	NA-13	6.13	9.3	17.9	17.4	0.11	32.2
	NA-14	5.5	< 5	15.3	14.6	0.07	27.1
	NA-15	6.1	< 5	17.3	20.6	0.05	39.9
	NA-31	6.8	< 5	21.6	30	0.07	41.7
	NA-32	7.12	< 5	12.3	36.2	0.02	69.7
	NA-34	6.7	5.38	14.2	48.1	0.02	64.6
	NA-36	6.8	< 5	26.5	23.9	0.04	42.2
	NA-38	7.26	18.5	33.4	51.4	0.14	66.5
	NA-39	7.06	8.66	22.7	74.8	0.07	84.5
	NA-40	6.67	< 5	19.4	96.1	0.16	104
	NA-41	7.04	< 5	16.8	90.4	0.32	99.2
	NA-43	6.95	17.2	25.4	35.2	0.03	55.3
	NA-49	7.06	< 5	20.1	34.9	0.03	51.9
	NA-53	6.91	< 5	22.4	50.6	0.02	67.8

[illegible]



[illegible]



Amostra	Ponto	Campanha	Cromo Diss. (mg/L)	Mercúrio Diss. (mg/L)	Níquel Diss. (mg/L)	Zinco Diss. (mg/L)	Urânio Diss. (mg/L)	Prata Diss. (mg/L)	Selênio Diss. (mg/L)	Vanádio Diss. (mg/L)
P-1	Poço Andrade Jr.	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-2	Fonte Paulo Cherulli	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-3	Poço P-4	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-4	BU06A	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-5	Alto Paulista	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-7	LAGO-F	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-8	LAGO-E	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-9	Poço P-1	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-10	PP02	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-11	PP3	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-13	Dona Beija	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-14	LAGO-A	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-15	PAP-7	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-17	BEJA-1	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
P-18	BEJA-2	Raposo (2011)	-	-	-	-	-	-	-	-
SWS-01	INA-06	Schlumberger (2016)	0,003	< 0,0001	0,008	0,182	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
SWS-02	INA-05	Schlumberger (2016)	< 0,001	< 0,0001	0,006	0,068	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
SWS-03	NA-41	Schlumberger (2016)	0,003	< 0,0001	0,006	0,118	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
SWS-04	B7	Schlumberger (2016)	< 0,001	< 0,0001	0,004	0,188	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
SWS-05	NA-16	Schlumberger (2016)	< 0,001	< 0,0001	0,011	0,117	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002
SWS-06	NA-27	Schlumberger (2016)	< 0,001	< 0,0001	0,002	0,255	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
SWS-07	NA-13	Schlumberger (2016)	0,003	< 0,0001	0,001	0,803	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,001
SWS-08	NA-1	Schlumberger (2016)	0,002	< 0,0001	0,002	0,172	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,002
SWS-09	Baritina	Schlumberger (2016)	< 0,001	< 0,0001	< 0,001	0,113	< 0,001	< 0,001	0,001	< 0,001
SWS-10	Chuva	Schlumberger (2016)	-	-	-	-	-	-	-	-

## APÊNDICE D – Resultados do balanço iônico

Amostra	Principais Cátions (mg/L)							Principais Ânions (mg/L)						Resultados					
	Cálcio	Magnésio	Sódio	Potássio	Bário	Ferro	Manganês	Cloreto	Bicarbonato	Nitrato	Sulfato	Fluoreto	Fosfato	Scátions	Sânions	CE	Erro	Erro Máx. Permitido	Situação
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	F <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	(mEq/L)	(mEq/L)	uS/Cm	%	(%) Custodio & Llamas (1983)	
INA-03	2.84	0.772	0.5	0.447	0.0875	0.114	0.136	2.96	12.3	0	0	0.565	0.02	0.25	0.32	17.2	11.82	30	OK
INA-04	7.59	3.95	0.993	1.42	0.196	0.0376	0.005	0	24.8	1.26	10.8	0.449	0.43	0.79	0.69	62.0	6.67	10	OK
INA-05	7.32	0.789	0.382	0.146	2.6	0.0141	0.0787	9.13	10.4	1.5	0	1.29	1.4	0.49	0.56	45.8	6.81	30	OK
INA-08	3.94	0.753	3.8	0.324	5.5	3.48	0.776	0	7.88	0.7	13.5	1.01	0.79	0.67	0.50	20.0	14.28	30	OK
PP-11	17.9	6.54	0.65	1.76	0.235	0.00465	0.00149	1.5	70	0	10.7	0.9	0.68	1.51	1.48	148.0	0.89	10	OK
NA-1	2.28	1.91	0.603	1.13	0.112	0.214	0.0333	0	26.3	0	0	0.36	0.06	0.34	0.45	43.4	14.69	30	OK
NA-4	4.5	3.2	1.4	3.71	0.628	0.604	0.0788	2.4	26	0	9.59	0.29	0.03	0.68	0.71	61.1	2.36	10	OK
NA-06	5.2	1.83	0.414	0.966	0.0964	0.336	0.021	1.3	21.6	0	0	0.21	0.1	0.47	0.41	39.9	7.10	30	OK
NA-07	5.8	2.2	0.932	1.32	0.581	0.38	0.224	1.6	25.9	0.5	0	0.15	0.03	0.58	0.49	58.3	8.31	10	OK
NA-10	6.56	5.91	1.6	3.98	0.633	1.95	0.152	1	46.1	0.53	15	0.64	0.12	1.07	1.14	74.8	3.32	10	OK
NA-13	3.07	2.36	1.24	2.3	0.375	4.91	0.299	1.1	24.9	0.72	17.6	0.26	0.11	0.65	0.83	50.3	12.26	30	OK
NA-14	1.84	2.42	1.18	1.75	0.0945	0.0399	0.00553	0	16	1.76	15.1	0.16	0.07	0.39	0.62	42.3	22.47	30	OK
NA-15	3.09	3.13	1.2	2.18	0.173	0.206	0.0641	1.2	23.9	0.97	0	0.14	0.05	0.53	0.45	62.2	8.26	10	OK
NA-31	5.39	4.02	1.7	2.56	0.167	0.396	0.0399	1.1	35.3	0	11.8	0.25	0.07	0.76	0.87	65.2	7.00	10	OK
NA-32	9.16	3.24	0.614	1.03	0.103	0.131	0.125	0	41.2	0	10.8	0.24	0.02	0.79	0.91	109.0	7.41	10	OK
NA-34	11.4	4.77	0.58	3.53	0.188	0.965	0.387	1	55.1	0	12.8	0.25	0.02	1.13	1.21	101.0	3.58	10	OK
NA-36	4.51	3.07	1.56	3.81	0.284	3.46	0.132	1.1	29.7	0	15.9	0.32	0.04	0.78	0.87	66.0	5.56	10	OK
NA-38	9.35	6.81	2.54	5.04	1.27	5.4	0.431	2	53.5	0	18.3	0.87	0.14	1.49	1.36	104.0	4.50	10	OK
NA-39	15.6	8.69	1.02	3.54	0.887	0.174	0.0738	0	69.1	0	19.1	0.64	0.07	1.65	1.57	132.0	2.59	10	OK
NA-40	23.9	8.83	1.45	2.2	1.21	0.234	0.037	2	85.2	0.6	11	0.51	0.16	2.07	1.72	163.0	9.02	10	OK
NA-41	21	9.21	1.28	2.56	1.62	0.0241	0	3.8	78	0	9.73	0.48	0.32	1.95	1.62	155.0	9.15	10	OK
NA-43	6.19	4.8	2.55	3.78	0.102	0.0143	0.001	0	36.2	0.61	13.8	0.06	0.03	0.91	0.89	86.4	1.02	10	OK
NA-49	7.81	3.747	1.27	2.74	0.513	0.15	0.0319	1.4	39.8	0	11.5	0.27	0.03	0.84	0.95	81.1	6.12	10	OK
NA-53	9.25	6.67	2.07	4.42	0.565	0.728	0.245	1.1	54.4	0	14.5	0.39	0.02	1.26	1.25	106.0	0.41	10	OK

## APÊNDICE E

Amostra	Ponto	Campanha	$\delta^{18}\text{O}$ (‰VSMOW)	$\delta\text{D}$ (‰VSMOW)	Trítio (UT)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)	$^{14}\text{C}$ (‰pmC)
P-1	Poço Andrade Jr.	Raposo (2011)	-10,2	-69,1	< 0,2	-9,0	0,26
P-2	Fonte Paulo Cherulli	Raposo (2011)	-9,1	-66,7	< 0,2	-7,4	-
P-3	Poço P-4	Raposo (2011)	-8,3	-46,4	1,68	-15,9	-
P-4	BU06A	Raposo (2011)	-7,8	-45,8	1,67	-14,6	-
P-5	Alto Paulista	Raposo (2011)	-9,0	-54,9	0,62	-5,9	-
P-7	Lago F	Raposo (2011)	-5,2	-40,5	-	-9,8	-
P-8	Lago E	Raposo (2011)	-7,1	-42,9	-	-10,2	-
P-9	Poço P-1	Raposo (2011)	-6,7	-53,8	< 0,2	-14,0	-
P-10	PP02	Raposo (2011)	-7,5	-50,6	< 0,2	-13,6	-
P-11	PP3	Raposo (2011)	-7,5	-53,7	0,47	-17,3	-
P-13	Dona Beja	Raposo (2011)	-7,0	-49,3	0,76	-14,2	-
P-14	Lago A	Raposo (2011)	-6,1	-42,0	-	-10,6	-
P-15	PAP-7	Raposo (2011)	-7,2	-51,8	0,5	-15,4	-
P-17	BEJA-1	Raposo (2011)	-7,4	-52,0	0,71	-13,7	-
P-18	BEJA-2	Raposo (2011)	-6,9	-53,7	0,63	-15,0	-
SWS-01	INA-06	Schlumberger (2016)	-8,0	-51,4	< 0,8	-11,0	68,64
SWS-02	INA-05	Schlumberger (2016)	-8,1	-53,0	< 0,8	-12,1	53,91
SWS-03	NA-41	Schlumberger (2016)	-7,3	-47,9	< 0,8	-13,3	53,76
SWS-04	B7	Schlumberger (2016)	-5,0	-33,1	-	-	-
SWS-07	NA-13	Schlumberger (2016)	-6,8	-44,3	< 0,8	-9,79	80,32
SWS-08	NA-1	Schlumberger (2016)	-7,1	-45,0	0,8	-13,73	81,58
SWS-10	CHUVA	Schlumberger (2016)	-10,9	-77,4	1	-	-

# **APENDICE F– ANO DE RECARGA X CONCENTRAÇÃO DE TRÍTIO NA ÁGUA**

<b>Ano de Recarga</b>	<b>Concentração de Trítio estimada para água meteórica - Araxá</b>	<b>Anos a partir da data da coleta (amostras de Raposo, 2011)</b>	<b>Anos a partir da data da coleta (amostras de Schlumberger, 2016)</b>	<b>Concentração de Trítio na água amostrada (amostras de Raposo, 2011)</b>	<b>Concentração de Trítio na água amostrada (amostras de Schlumberger, 2016)</b>
1953	1,3	58	63	0,05	0,04
1954	13,9	57	62	0,58	0,44
1955	2,0	56	61	0,09	0,07
1956	8,9	55	60	0,42	0,31
1957	5,7	54	59	0,28	0,21
1958	8,4	53	58	0,44	0,33
1959	6,3	52	57	0,35	0,26
1960	16,5	51	56	0,96	0,72
1961	11,9	50	55	0,73	0,55
1962	17,6	49	54	1,14	0,86
1963	30,7	48	53	2,11	1,60
1964	52,1	47	52	3,79	2,87
1965	44,3	46	51	3,41	2,58
1966	35,2	45	50	2,86	2,17
1967	25,4	44	49	2,19	1,65
1968	25,9	43	48	2,36	1,78
1969	23,0	42	47	2,21	1,67
1970	24,5	41	46	2,49	1,88
1971	18,7	40	45	2,01	1,52
1972	16,8	39	44	1,90	1,44
1973	13,3	38	43	1,59	1,21
1974	14,9	37	42	1,90	1,44
1975	12,7	36	41	1,71	1,30
1976	9,7	35	40	1,37	1,04
1977	10,2	34	39	1,54	1,16
1978	10,5	33	38	1,67	1,26
1979	8,3	32	37	1,40	1,06
1980	8,0	31	36	1,42	1,07
1981	7,5	30	35	1,40	1,06
1982	5,9	29	34	1,18	0,89
1983	5,4	28	33	1,14	0,86
1984	4,7	27	32	1,04	0,79
1985	4,6	26	31	1,07	0,81
1986	4,0	25	30	0,99	0,75
1987	3,9	24	29	1,02	0,77
1988	3,9	23	28	1,08	0,82
1989	3,7	22	27	1,09	0,83
1990	3,5	21	26	1,10	0,83
1991	3,4	20	25	1,11	0,84
1992	3,2	19	24	1,12	0,85
1993	3,1	18	23	1,13	0,86
1994	2,9	17	22	1,14	0,86
1995	2,8	16	21	1,15	0,87
1996	2,7	15	20	1,16	0,88
1997	2,6	14	19	1,17	0,89
1998	2,4	13	18	1,18	0,89
<b>Ano de</b>	<b>Concentração</b>	<b>Anos a partir</b>	<b>Anos a partir da</b>	<b>Concentração de</b>	<b>Concentração de</b>

<b>Recarga</b>	<b>de Trítio estimada para água meteórica - Araxá</b>	<b>da data da coleta (amostras de Raposo, 2011)</b>	<b>data da coleta (amostras de Schlumberger, 2016)</b>	<b>Trítio na água amostrada (amostras de Raposo, 2011)</b>	<b>Trítio na água amostrada (amostras de Schlumberger, 2016)</b>
1999	2,3	12	17	1,19	0,90
2000	2,2	11	16	1,20	0,91
2001	2,1	10	15	1,21	0,92
2002	2,0	9	14	1,22	0,93
2003	1,9	8	13	1,23	0,93
2004	1,8	7	12	1,24	0,94
2005	1,8	6	11	1,26	0,95
2006	1,7	5	10	1,27	0,96
2007	1,6	4	9	1,28	0,97
2008	1,5	3	8	1,29	0,98
2009	1,5	2	7	1,30	0,98
2010	1,4	1	6	1,31	0,99
2011	1,3	0	5	1,32	1,00
2012	1,3	-	4	-	1,01
2013	1,2	-	3	-	1,02
2014	1,1	-	2	-	1,03
2015	1,1	-	1	-	1,04
2016	1,0	-	0	-	1,05



## SÚMULA CURRICULAR

### **Tiago Antônio Torres Gomes**

Graduado em Engenharia Geológica pela Universidade Federal de Ouro Preto, em Julho de 2011, trabalhou desde o início do curso nas áreas de hidrogeologia e geotecnia de mina, em empresas de mineração no Quadrilátero Ferrífero.

Desenvolveu atividades relativas ao rebaixamento do nível de água na cava da Mina de Alegria Norte, como monitoramento hidrogeológico de poços tubulares profundos, controle da produção e qualidade da água. Definição, de acordo com o modelo hidrogeológico, de localização para novos poços e piezômetros. Criação e implantação da rotina de avaliações de estabilidade dos taludes operacionais e pilhas de estéril nas minas do Complexo Alegria.

Participou da contratação e acompanhamento de obras civis de contenção e estabilização artificial de taludes.

Desenvolveu aplicativos (bancos de dados em Access) para os dados de geotecnia de mina (SlopeSAM) e hidrogeologia (HydroSAM).

Em 2012 assumiu o *Start-up* das áreas de Hidrogeologia e Geotecnia de Mina de nióbio da CBMM, na cidade de Araxá. Desde então, vem desenvolvendo atividades para a caracterização do aquífero associada à mineralização de nióbio, com vistas a proposição de um sistema de rebaixamento do nível de água para garantir a continuidade das atividades mineiras.